

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta

Kari Iltanen

KOHDISTETUN IONISUIHKUN JA KRYOGEENISEN REAKTIIVISEN IONISYVÄETSAUKSEN YHDISTELMÄPROSESSIN KARAKTERISOINTI

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 10.9.2009

Työn valvoja:

Prof. Ilkka Tittonen

Työn ohjaaja:

DI Nikolai Chekurov

Tekijä: Kari Iltanen		
Työn nimi: Kohdistetun ionisuihkun ja kryogeenisen reaktiivisen ionisyväetsauksen yhdistelmäprosessin karakterisointi		
Päivämäärä: 10.9.2009	Kieli: Suomi	Sivumäärä: 5+58
Tiedekunta: Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta		
Professuuri: Sähköfysiikka		Koodi: S-129
Valvoja: Prof. Ilkka Tittonen		
Ohjaaja: DI Nikolai Chekurov		
<p>Tässä työssä karakterisoitiin kohdistetun ionisuihkun (FIB) ja kryogeenisen reaktiivisen ionisyväetsauksen (DRIE) yhdistelmästä muodostuvaa menetelmää nanoteknologian rakenteiden valmistusta ajatellen. Kyseessä on lupaava, mutta uusi menetelmä, jonka ominaisuuksia ei täysin tunneta. Tekemällä ioni-istutus suoraan FIBillä saadaan prosessia yksinkertaistettua sekä samalla mahdollistetaan monimutkaisten kuvioiden teko. Ioni-istutuksen jälkeen näytteet etsattiin kryogeenisellä ICP-RIE-prosessilla. Vasta karakterisoinnin jälkeen menetelmä voidaan ottaa yleiseen käyttöön.</p> <p>Riittävän voimakkaan ioniseostuksen tiedetään toimivan etsausmaskina. Jotta kyettäisiin ennustamaan ionien leviämää ja tunkeutumisvyyttä substraatissa, on ymmärrettävä kohdeatomien ja ionien välisiä vuorovaikutuksia, jotka jaetaan elektroni- ja ydinvuorovaikutuksiin. Ioni-istutuksen teoriaan perustuvien simulaattorien sekä ioniseostuksen maskiefektin perusteella on mahdollista ennustaa maskin koon ja käytetyn annoksen funktiona lopullisen kuvion koko.</p> <p>Kokeellisessa osuudessa määritetään aluksi ionisuihkun muoto tietyille ionisuihkun virroille käyttäen reikämatriisia, jossa reikien kokoa ja ioniannosta on vaihdeltu. Säteen muodon ja ionien leviämisen perusteella lasketaan ennuste lopullisen kuvion levenemälle verrattuna alkuperäiseen maskiin.</p> <p>Koska tarkoitus oli mitata kokonaisprosessin maksimiresoluutio tietyille virroille, testikuvioina käytettiin toisesta päästään kapeampia palkkeja ja välejä eri annoksille. Annosmääräkokeissa samaa maskia käytettiin eri annoksille kriittisen seostustason löytämiseksi.</p> <p>Etsatut kuvat mitattiin pyyhkäisyelektronimikroskoopin (SEM) avulla. Jokaiselle mitatuista virroista määritettiin maksimiresoluutio, joita tarkastelemalla tulee vakuuttuneeksi, että menetelmä sopii erinomaisesti hyvin erilaisten nanorakenteiden valmistukseen. Lopullisten rakenteiden koko voi olla alle sadasta nanometristä useisiin mikrometreihin.</p>		
Avainsanat: ioni-istutus, FIB, kryo-DRIE, nanovalmistusmenetelmä, karakterisointi		

Author: Kari Iltanen		
Title: Characterization of the combined nanofabrication process consisting of the focused ion beam and the cryogenic deep reactive ion etching		
Date: 10.9.2009	Language: Finnish	Number of pages: 5+58
Faculty: Faculty of Electronics, Communications and Automation		
Professorship: Physics of microtechnologies		Code: S-129
Supervisor: Prof. Ilkka Tittonen		
Instructor: M.Sc.(Tech.) Nikolai Chekurov		
<p>In this thesis a method for the fabrication of nanostructures consisting of a combination of focused ion beam (FIB) and cryogenic deep reactive ion etching (DRIE) was characterized. This is a promising, but new technique, of which properties are not known in every detail. By performing the ion implantation directly with FIB, the fabrication process can be simplified. At the same time making complex patterns becomes possible. Samples were etched with the cryogenic ICP-RIE process after the ion implantation. A detailed characterization is required in order to make the process available for the general use.</p> <p>Sufficiently high ion doping is known to act as an etch mask. To be able to predict spread and stopping range of ions in the substrate, one should understand interactions between the target atoms and ions. These effects are divided into electron- and nuclear interactions. With those simulators that are based on the theory of ion implantation and masking effect of ion doping, it is possible to predict the size of the final pattern as a function of the size of the mask and the used dose.</p> <p>In the experimental part, the transverse profile of the ion beam is first determined for certain ion beam currents using the hole matrix, where the size of the holes and ion dose are being varied. Based on the beam profile and spreading of the ions it is possible to calculate a prediction for the widening of the final pattern relative to the size of the structures in the mask.</p> <p>One of the goals was to find the maximum resolution of the whole process for certain currents. For this purpose tapered bars and gaps were used for various doses as test patterns. In testing the amount of dose, the same mask was used with different doses to find a critical doping level.</p> <p>Etched patterns were measured with a scanning electron microscope (SEM). For each of the measured currents, the maximum resolution was determined. Based on this study one can deduce that the method is excellent for the fabrication of nanostructures. The size of the final structures can be varied in a range from a little below one hundred nanometer to several micrometers.</p>		
Keywords: ion-implantation, FIB, Cryo-DRIE, nanofabrication, characterization		

Esipuhe

Professori Ilkka Tittonen toimi työn valvojana ja antoi työn loppuvaiheessa arvokkaita neuvoja. Ohjaaja Nikolai Chekurovin apu oli merkittävää suunniteltaessa työn rakentetta ja tehtäviä kokeita sekä laboratoriossa mittauksia tehdessä. Äitini auttoi kieliasun kanssa.

Otaniemi, 10.9.2009

Kari Iltanen

Sisältö

Tiivistelmä	ii
Tiivistelmä (englanniksi)	iii
Esipuhe	iv
Sisällysluettelo	v
1 Johdanto	1
2 Teoria	5
2.1 Ionisuihkun vaikutus materiaaliin	5
2.2 Ioni-istutuksen käyttö etsauksen hallinnassa	15
2.3 ICP-RIE-etsausprosessin toiminta ja ominaisuudet	18
3 Testausmenetelmät	21
3.1 Ioni-istutusprofilit	21
3.2 Pinta- ja 3D-kuvioiden tutkiminen	27
4 Valmistustekniikka	31
4.1 Laitteistokuvaukset	31
4.2 Koejärjestelyt	36
5 Mittaustulokset ja niiden anylysointi	40
5.1 Mittaukset	40
5.2 Tulokset	44
6 Johtopäätökset	53
Viitteet	55
Liite A	58

1 Johdanto

Selektiivinen etsaus on tärkeimpiä menetelmiä nano- ja mikrometrikokoluokan rakenteiden valmistuksessa. Menetelmässä valmistettavan rakenteen halutut kohdat suojataan etsausta kestäväällä maskilla ja loput syövytetään, jolloin maskin kuvio kopioituu substraattiin. Etsausmaskin materiaali riippuu prosessista, mutta yleensä maskina käytetään metalliohukalvoja, polymeerejä, oksideja tai nitridejä. Myös suoraa ioniseostusta on jo pitkään käytetty etsausmaskien tekemiseen.

Seostus tehtiin aikaisemmin diffuusiomenetelmällä, mutta sittemmin on siirrytty ioni-istutuksen käyttöön. 80-luvun alkupuolella tehtävään ryhdyttiin käyttämään myös kohdistettua ionisuihkua (FIB), jonka säteen puoliarvoveveys on parhaimmillaan alle 10 nm. Nykyisin ioniseostusta käytetään etsausmaskina märkäetsauksen lisäksi myös RIE (reaktiivinen ionietsaus)-prosesseissa, joissa etsauskaasujen radio- taajuisella sähkömagneettisella kentällä (radio frequency=RF) ionisoidut molekyylit osuvat kohteen pintaan ja reagoivat kohdeatomien kanssa. Kryogeenisen reaktiivisen ionisyväetsauksen (DRIE, DeepRIE) ja ICP-RIEn (induktiivisesti kytketty plasma- RIE; DRIE-järjestelmä kahdella eri tehonlähteellä) käyttö yleistyy valmistettavien rakenteiden koon pienetessä.

Pari vuotta sitten prosessiin kuluvan kokonaisajan lyhentämiseksi kehitetty FIB+ICP-RIE-yhdistelmäprosessi on yleistymässä, mutta sen ominaisuuksia ja suorituskykyä ei täysin tunneta. Ioniseostuksen maskiefektin eli etsausmaskina toimimisen syistä on esitetty useita eri arvioita. Kryogeenisen ICP-RIEn toimintaa ei täysin ymmärretä, joten ioniseostuksen maskiefektin voimakkuutta on hyödyllistä tutkia kokeellisesti. Vaikka märkäetsausprosessit tunnetaan plasmaetsausta paremmin, ei niidenkään maskiefktiä kyetä tarkastelemaan teoreettisesti. Maskiefktiä tarkastelemalla voidaan arvioida ioniseostuksen selektiivisyyttä etsausprosessissa.

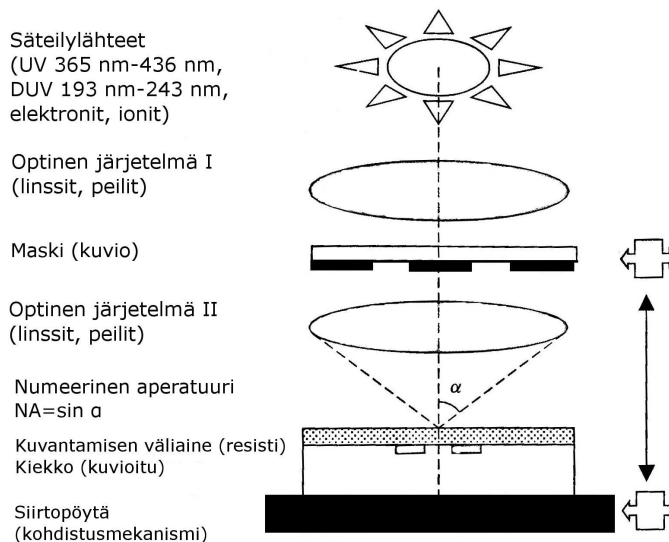
Tämän työn teoriaosuuden ja mittausten perusteella kyetään arvioimaan saatavan kuvion koko, kun maskin koko tunnetaan. Lähtökohtana käytetään teoriaa ionien käyttäytymisestä materiaalissa ja valmiita ioni-istutussimulaattoreita sekä ionisuihkun muotoa ja leveyttä, joiden perusteella arvioidaan kuinka kaukana kriittisen annoksen raja on valotuspisteestä.

Ioni-istutusprofiilien laskemiseen on käytettävissä lukuisia klassiseen molekyylidynamiikkaan perustuvia menetelmiä, jotka perustuvat kvanttimekaniikasta johdettuihin vuorovaikutuspotentiaaleihin. Näihin menetelmiin ja vastaavaan teoriaan liittyen löytyy runsaasti kirjallisuutta ja artikkeleita.

Kokeellisessa osuudessa pyritään kehittämään FIB+DRIE-valmistusprosessia luomalla standardoitu kohdistusprosessi FIBille sekä karakterisoimaan prosessia useilla eri ioni-istutusparametreilla. Mielenkiintoisin optimointiparametri on eri asetuksilla saatava pienin mahdollinen viivanveveys. Resoluutiolle määritetään myös laskennallinen arvio ja saatua ennustetta verrataan mittaustuloksiin laskennallisen menetelmän testaamiseksi. Tällä tavalla lisätään FIB+ICP-RIE-yhdistelmäprosessin käyttökel- poisuutta sekä ymmärrystä sen ominaisuuksista ja toiminnasta. Toimiva laskennal- linen menetelmä helpottaa rakenteiden suunnittelua ja parantaa niiden laatua sekä

vähentää kokeiden tarvetta ja helpottaa niiden suunnittelua.

Litografiamenetelmistä



Kuva 1: Kaaviokuva litografiaan käytettävästä laitteistosta. Optinen järjestelmä II on vain projektiolaitteistoissa. [8]

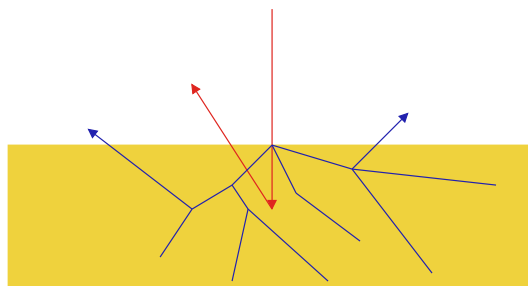
Kuva 1 esittää resistin (kuvantamisen väliaine) valotukseen perustuvien litografijärjestelmien rakennetta lohkokaaviotasolla. Optisessa litografiassa kohteen pinnassa oleva noin yhden mikrometrin paksuinen resistikerros valotetaan maskin läpi UV-valolla. Riippuen maskin etäisyydestä resististä puhutaan joko kontakti-, lähi (proximity)- tai projektiovalotuksesta. Kontaktivalotus on lähivalotuksen ääritapaus, jossa maski painetaan kiinni resistiin valotuksen ajaksi. Lähivalotuksessa maski on korkeintaan joidenkin kymmenien mikrometrien päässä resististä ja maskin kuviot siirretään 1:1-suhteessa kohteeseen. Etuna projektiovalotukseen nähden on yksinkertaisempi optiikka, mutta maskin teko on hankalampaa. Projektiovalotuksessa maskin kuviot ovat noin neljä kertaa suurempia kuin resistille syntyvä lopullinen kuvio. Pinnan, jolle resisti levitetään, tulee olla tasainen tai muutoin valotus epäonnistuu resistin paksuusvaihtelujen takia. [8]

Maskit tehdään useimmiten kvartsista. Valmiin levyn toiselle puolelle kasvatetaan muutaman kymmenen nanometrin paksuinen metallikalvo (kromia), johon haluttu kuvio kirjoitetaan elektronisuihkulitografialla. Muovikalvoille tulostetut maskit tulevat kyseeseen yli viiden mikrometrin viivanleveyksillä. Käytettävän UV-valon aallonpituus on yleensä 193 nm teollisuuden huippulaitteissa, mutta useimmissa laitteissa aallonpituus on joko 365 nm tai 436 nm. [6, 8]

Optinen litografia soveltuu hyvin massatuotantoon, sillä valotusajat ovat minuutin luokkaa ja kaikki maskin kuviot siirtyvät kerralla. Valotettu resisti kehitetään kemikaaleilla, jotka resistityypistä riippuen liuottavat valotetun (positiivinen) tai

valottamattoman (negatiivinen) alueen. Prosessin vaatimien maskien hinta kasvaa eksponentiaalisesti viivanleveyden kavetessa. Koska prosessi vaatii maskin käyttöä ja pienen viivanleveyden laitteet ovat erittäin kalliita optinen litografia sopii huonosti tutkimus- ja tuotekehitystarkoituksiin, jossa täsmälleen samanlaisia rakenteita tehdään vain vähäisiä määriä. Teollisuudessa käytetään tällä hetkellä jopa 45 nm prosessia ja 32 nm otetaan käyttöön vuosina 2009-2010. MIT:n tutkijoiden mukaan optisella litografialla voidaan päästä jopa 12 nanometrin rakenteisiin [4]. [6]

Elektronisuihkulitografiassa (EBL) resisti valotetaan elektroneilla joko suorakirjoitus- tai projektiomenetelmällä. Suorakirjoituksessa resistin valotus tapahtuu piste kerrallaan sarjamuodossa, joten prosessi on joustava mutta hidas. Se tarjoaa erittäin hyvän resoluution, joka on parhailla laitteilla noin 20 nm. Käyttötarkoituksia suorakirjoitukselle ovat optisen litografian maskien teko sekä tutkimus-, tuotekehitysprosessit ja piensarjatuotanto. Projektioprosessissa resisti valotetaan pyyhkäisemällä elektronisuihkulla maskin yli rivi kerrallaan, ja se sopii käytettäväksi kun tuotantomäärät ovat liian pieniä optiseen litografiaan. Etuina suorakirjoitukseen nähden ovat nopeampi prosessi ja maskin kuvioiden skaalautuminen kuten optisessa projektiolitografiassa. Viivanleveys on pienimmillään noin 60 nm. [6, 8]

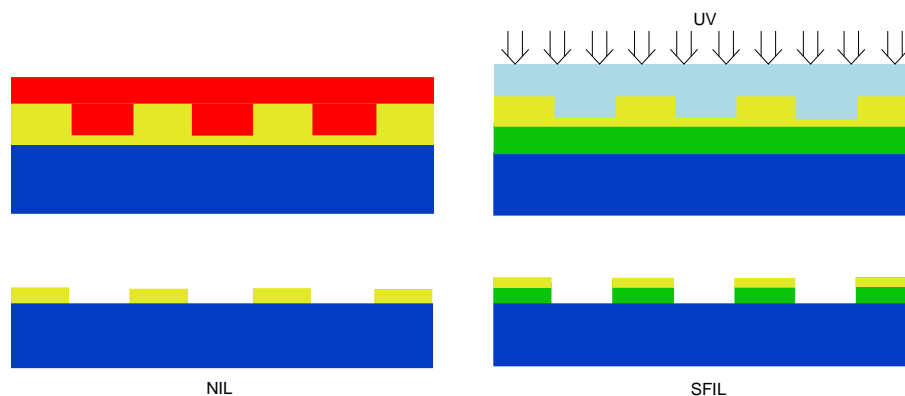


Kuva 2: Elektronien sironta resistissä.

Elektronisuihkulitografiassa käytetään yleensä 2 tai 3 valotuspistettä rinnakkain ja osin päällekkäin varmistamaan kuvion onnistuminen. Elektronisuihkulitografian suurin ongelma on sen hitaus, mikä tekee siitä sopimattoman massatuotantoon. Ongelmana on myös elektronien siroamisesta johtuva valotuskuvion leviäminen resistissä. Kuva 2 esittää elektronien sirontaa resistissä. [6]

Ionisuihkulitografia (IBL) perustuu hyvin samantylaiseen prosessiin kuin elektronisuihkulitografia. Se mahdollistaa hieman pienemmän viivanleveyden ja nopeamman valotuksen. Ionit eivät myöskään kulkeudu resistissä yhtä laajalle alueelle kuin elektronit. Vain suorakirjoitusmenetelmä on käytössä, mutta ionisuihkulla voi kirjoittaa myös suoraan kohteen pintaan ilman resistin käyttöä, jolloin kontaminaatio voi tulla ongelmaksi. [6]

Nanopainatuslitografia jaetaan yleensä NIL (nanoimprint lithography)- ja SFIL (step and flash imprint lithography)-menetelmiin. NIL-menetelmässä (kuva 3 vasemmalla) substraatin pintaan levitetään resistikerros, minkä jälkeen muotti painetaan kiinni substraattiin kuvioiden siirtämiseksi resistiin. Resistinä käytetään termoplastista materiaalia, joka kuumennetaan siirtymälämpötilan yläpuolelle neste-



Kuva 3: Prosessikaaviot NIL:lle ja SFIL:lle. Substraattia kuvataan tumman sinisellä värillä. Vasemmalla muottia kuvataan punaisella ja resistiä keltaisella värillä. Oikealla vaalean sinisellä värillä kuvataan muottia. Keltainen väri kuvaa fotopolymeeroituvaa kerrosta ja vihreä väri siirtokerrosta. UV-valotusta kuvataan kuvan yläreunassa olevilla nuolilla.

mäisen käyttäytymisen aikaansaamiseksi. Kun muotti on paikallaan, resisti jäädytetään siirtymälämpötilan alapuolelle sen kiinteyttämiseksi, jonka jälkeen muotti irrotetaan. Puristetuilta alueilta poistetaan ylimääräinen resisti substraatin pinnan paljastamiseksi epäisotrooppisella etsauksella. NIL-menetelmässä voidaan myös käyttää termoplastin sijaan UV-säteilyllä kovetettavaa resistiä. [10]

SFIL-menetelmässä (kuva 3 oikealla) substraatin pintaan levitetään siirtokerros (transfer layer), joka on yleensä jotain orgaanista ainetta kuten ftoresistiä. Tämän jälkeen muotti tuodaan siirtokerroksen lähelle ja niiden väliin laitetaan pisara fotopolymeeroituvaa organopiitä. Seuraavaksi muotti painetaan kiinni siirtokerrokseen ja rakennetta valotetaan UV-säteilyllä muotin läpi. Sen jälkeen muotti irrotetaan ja siirtokerros kuvioidaan O_2 -RIE:llä organopiistä olevan etsausesteen toimiessa maskina. Lopuksi etsauseste poistetaan, jolloin substraatin pintaan jää siirtokerrosmaski. [10]

Sekä NIL- että SFIL-menetelmien muotit tehdään yleensä elektronisuihkulitografialla. SFIL-muotin on oltava läpinäkyvä, mutta NIL-muotti voi olla valoa läpäisemätönkin. Muoteille voidaan joutua tekemään erilaisia pintakäsittelyjä tarttumisen estämiseksi. Nanopainatuslitografia ja erityisesti SFIL-menetelmä on vielä kehitysvaiheessa, mutta kyseessä on fotolitografiaa halvempi ja yksinkertaisempi menetelmä. NIL:n etuna on SFIL:iin nähden se, ettei UV-valotusta ja etsausestekerrosta tarvita, mutta SFIL:ssä muotin kohdistus on helpompaa. Nanopainatus on massatuotantoprosessi, jolla on periaatteessa mahdollista tehdä jopa alle 10 nanometrin rakenteita. Mahdollisia sovelluksia nanopainatuslitografialle ovat ftoniikka, resonaattorit, kvanttipisteet ja -langat sekä kehätransistorit. [10]

2 Teoria

Vahvasti seostetun piin tiedetään toimivan etsausmaskina sekä märk- että kuivaetsauksessa. Maskiefekti esiintyy p+-kerroksissa kun piitä on seostettu riittävän suurella boori-konsentraatiolla. Sama efekti on havaittu galliumilla, joka on myös p-tyypin seostusatomi piissä. Kohdistetun ionisuihkun (FIB) laitteet, joilla voidaan suorittaa maskitonta nanokuviointia, käyttävät yleensä galliumia. FIB:llä voidaan suorittaa myös ioni-istutusta. [26]

Tarkasteltaessa etsausmaskin tekoa FIBillä on tutkittava ionisuihkun vaikutusta kiinteään aineeseen. Tavoitteena on ymmärtää ionisuihkun vaikutukset materiaaliin, jotta kyetään kehittämään laskennallinen menetelmä kokonaisprosessin lopputuloksen ennustamiseksi. Tähän pääsemiseksi on kyettävä määrittämään ioni-istutusprofiilit, jotka saadaan johdettua laskennallisilla menetelmillä. Kokonaisprosessin toiminnan ja ominaisuuksien ymmärtämiseksi tarkastellaan lyhyesti myös ioni-istutuksen käyttöä etsauksen hallinnassa sekä ICP-RIE-etsausprosessin toimintaa ja ominaisuuksia.

2.1 Ionisuihkun vaikutus materiaaliin

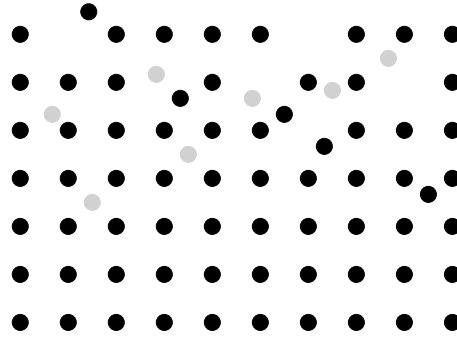
Istutus- ja vaurioprofilien saamiseksi on turvauduttava laskennallisiin menetelmiin, jotka perustuvat klassiseen dynamiikkaan ja kvanttimekaniikasta johdettuihin potentiaaleihin. Yleensä käytetään valmiita simulaattoreita, jotka perustuvat edellä mainittuihin laskennallisiin menetelmiin. Profilien laskeminen aloitetaan yhdestä valotuspisteestä ja huomioimalla useammasta pisteestä johtuvat efektit kyetään määrittämään ioni-istutusprofiili todelliselle valotuskuviolle. Käytännön laskentaa varten esitellään binääritörmäysapproksimaatio (BCA).

2.1.1 Ionien käytös materiaalissa

Kun kohdemateriaalia pommitetaan ionisuihkulla, osa ioneista kokee ydintörmäyksen ja muuttaa rajusti kulkusuuntaansa. Toiset ionit kokevat elektronipysäytyksen. Ydintörmäysten merkitys ionien kokonaisenergianmenetyksessä riippuu käytetystä energiasta ja ionilajista. Ydintörmäys on vallitseva pysäytysmekanismi pienillä nopeuksilla ($E_k^{ioni} \ll 25 \text{ keV/amu}$) ja raskailla ioneilla, kun taas suurilla nopeuksilla ($E_k^{ioni} \gg 25 \text{ keV/amu}$) ja keveillä ioneilla elektronipysäytys muuttuu vallitsevaksi. [21]

Kohdemateriaalissa ioneihin kohdistuvat voimat saadaan atomien välisistä potentiaaleista, jotka johdetaan kvanttimekaanisesti. Potentiaalien tarkkaa muotoa ei kyetä laskemaan, mutta niille löytyy tarkkoja approksimaatioita. ZBL-potentiaali perustuu analyyttiseen funktioon, jolla kyetään kuvaamaan atomien välisiä potentiaaleja varsin tarkasti. [21]

Ydintörmäys on luonteeltaan sellainen prosessi, jossa materiaaliin ammuttu ioni törmää elastisesti kohteen atomiin. Kohdeatomi irtoaa paikaltaan hilasta vain, mikäli



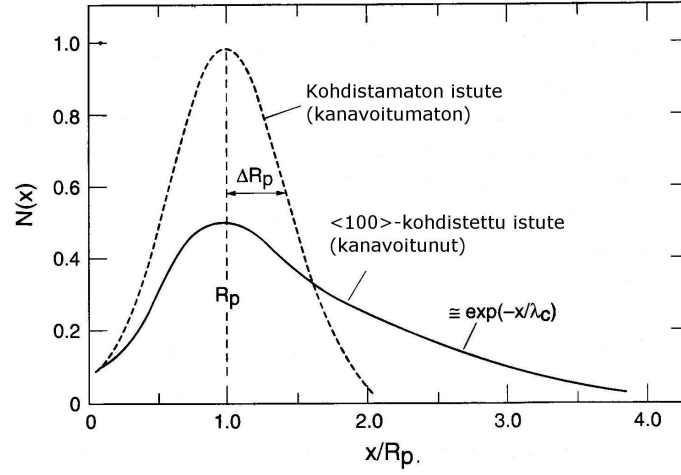
Kuva 4: Kide ioni-istutuksen jälkeen. Ioneja on kuvattu harmaalla värillä.

ioni luovuttaa tarpeeksi energiaa törmäyksessä. Jos luovutettu energia ei riitä atomin irrottamiseen, alkaa kohde värähdellä. Paikaltaan irronnut atomi voi joko lähteä kohteesta, jos törmäys tapahtuu näytteen pinnalla, tai saamastaan energiamäärästä riippuen jäädä välisijalle. Toinen vaihtoehto on sellainen, että kyseinen atomi törmää toiseen atomiin, mutta ei pysty irrottamaan sitä paikaltaan. Mikäli törmäyksessä siirtyy tarpeeksi energiaa, kohde irtoaa ja törmääjä ottaa sen paikan kiteessä. Nämä korvaustörmäysketjut (replacement collision sequence) ovat piissä erittäin lyhyitä, vain muutaman atomikorvauksen mittaisia [25]. Lisäksi on mahdollista, että törmääjä pysyy vapaana ja kohde irtoaa. Tässä tapauksessa kumpikin atomi voi kokea minkä tahansa edellä kuvatuista tapahtumista. Kuva 4 esittää kidettä ioni-istutuksen jälkeen kuvaten kuinka osa hilan atomeista on siirtynyt pois alkuperäisiltä paikoiltaan.

Elektronipysäytyksessä ioni menettää energiaansa vähitellen kohdemateriaalin elektroneille ja muuttaa samalla hieman suuntaansa. Myös ydintörmäysten aikana tapahtuu elektronien välistä vuorovaikutusta, jossa menetetään energiaa. Jos törmääjä tulee kohti pienessä tulokulmassa, elektronivuorovaikutus pienentää ydintörmäyksen todennäköisyyttä. Jos törmäys tapahtuu riittävän suurella tulokulmalla tai suurella energialla, elektronivuorovaikutukset eivät kykene estämään ydintörmäystä.

Elektronipysäytyksessä energiaa menetetään suorissa liike-energian siirroissa kohteen elektroneille, missä on kyse pääasiassa elektroni-elektronitörmäyksistä. Myös vyörakenteen elektronien mahdollinen virittyminen on huomioitava. Muita energianmenetyskohteita ovat kohdeatomien virittyminen ja ionisoiminen. Myös substraattiin tunkeutuva ioni voi virittyä, ionisoitua tai kaapata elektronin kuluttaen liike-energiaansa.

Kanavoitumisessa tietyissä suunnissa kohteeseen osuvat ionit törmäävät kohteen atomiytimiin erittäin harvoin, jolloin elektronipysäytyksen vallitessa energianmenetysmekanismi ionit päätyvät normaalia syvemmälle kidevaurioiden pysyessä vähäisinä. Kanavoituvat ionit ohjautuvat kiteen atomien elektronivuorovaikutusten avulla syvälle substraattiin ja saattavat aiheuttaa eksponentiaalisesti vaimenevan ioniprofiilin normaalin gaussisen sijaan kuten nähdään kuvasta 5. Ilmiö on erittäin herkkä kidesuuntien suhteen sallien vain noin viiden asteen poikkeaman (kriittistä kulmaa merkitään ψ_2 :llä), jonka tarkka arvo riippuu ionien energiasta, ionilajista ja sub-



Kuva 5: Kanavoinnista johtuvat ionijakaumien erot. [21]

straatista.

Yhtälössä

$$\psi \leq \psi_2 \equiv [(a_{TF}/d)\psi_1]^{1/2} \quad [21] \quad (1)$$

annetaan kanavointikriteeri hiukkaselle, jonka tulokulma on ψ ja energia E . Havaitaan, että kriittinen kulma ψ_2 riippuu Thomas-Fermi-vaimennusetaisyydestä a_{TF} , atomien välisestä etäisyydestä d ja funktiosta ψ_1 . Kriittisen kulman suuruuden havaitaan riippuvan kidesuunnasta lähinaapurietäisyyden d kautta.

Yhtälöstä

$$\psi_1 = (2Z_1Z_2e^2/Ed)^{1/2} \quad (2)$$

havaitaan, että ψ_1 riippuu kohteen ja törmääjän järjestysluvuista Z_1 ja Z_2 sekä energiasta E ja etäisyydestä d .

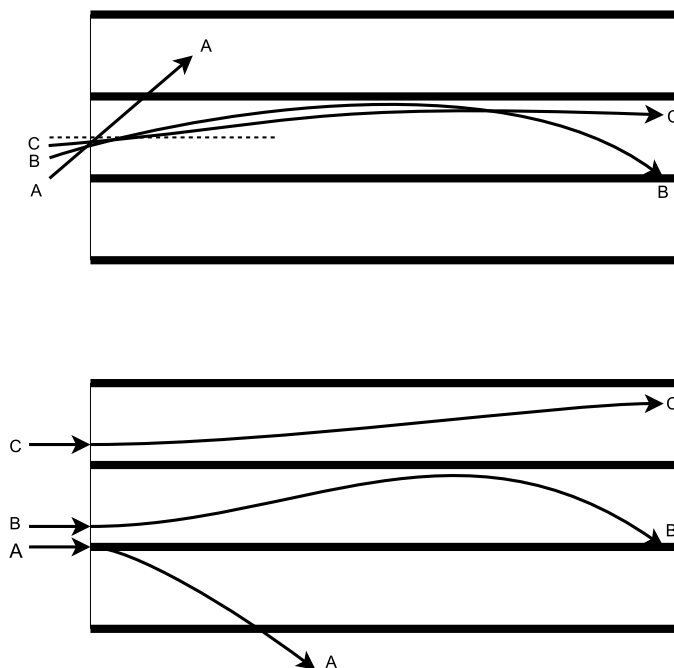
Yhtälössä

$$a_{TF} = \frac{0.88534a_0}{(Z_1^{1/2} + Z_2^{1/2})^{2/3}} \quad a_0 = 52.9 \text{ pm (Bohrin säde)} \quad (3)$$

annetaan Thomas-Fermi-vaimennussäde a_{TF} , jonka havaitaan riippuvan Z_1 :sta ja Z_2 :sta.

Kuvassa 6 esitellään ionien kulkuratoja kiteessä kahdelle eri lähtöpistejoukolle. Ylemmässä kuvassa ionit osuvat samaan pisteeseen eri kulmissa. Alemmassa kuvassa niiden tulosuunta on atomirivien suuntainen, mutta osumapisteeet vaihtelevat. Ionijoukko C etenee syvälle, koska ionit kohtaavat hilan atomirivit pienessä tulokulmassa jolloin elektronivuorovaikutukset vallitsevat. Ionijoukko B puolestaan pääsee hieman kanavoitumattomia ioneja syvemmälle, mutta poistuu kanavasta melko nopeasti kohdatessaan atomirivin suuressa tulokulmassa. Ionijoukko A puolestaan ei kanavoidu lainkaan vaan etenee suoraan atomirivien poikki. [16, 21]

Kanavoitumisen käyttökelpoisuus ioni-istutuksessa kaatuu käytännössä sen pysähtymismatkan heikkoon ennustettavuuteen ja vaikeuteen saada ioneja pinnan lähelle. Ydintörmäykset voivat ohjata ioneja pää- ja alikanaviin, vaikka ne eivät alun



Kuva 6: Kaaviokuva kanavoinnista. Ylemmässä kuvassa ionit osuvat samaan pisteeseen eri kulmissa, jolloin ionijoukko A etenee suoraan atomirivien poikki eikä kanavoidu. Ionijoukko B puolestaan osuu pienemmässä tulokulmassa kuin joukko A ja etenee syvemmälle atomirivin elektronivuorovaikutusten ohjaamana, mutta kohtaa pian toisen atomirivin jyrkässä kulmassa ja etenee sen poikki poistuen kanavasta. Ionijoukko C kanavoituu, sillä sen tulokulma on riittävän pieni, jotta kohtaamiset atomirivien kanssa ohjaavat ioneja syvemmälle. Alemmassa kuvassa ionit osuvat kohteeseen samansuuntaisesti, mutta eri kohtiin. Ionijoukko A etenee kanavan poikki nopeasti ja jyrkästi, kun taas B:llä ensikosketuksessa ionit ohjautuvat kanavan toista reunaa kohti, jonka ne läpäisevät kohdatessaan sen riittävän suuressa tulokulmassa. Ionijoukko C kanavoituu koska kohtaamiset atomirivien kanssa tapahtuvat pienessä tulokulmassa, jolloin elektronivuorovaikutukset ohjaavat ioneja kanavassa.

perin kanavissa olleetkaan. Myös kanavissa jo olevat ionit voivat kulkeutua muihin kanaviin ydintörmäysten seurauksena. Mahdolliset ioniprofilissa olevat matalan konsentraation alueet johtuvat pääosin syvälle kanavoituneista ioneista [27].

Näytteen lämpeneminen johtuu pääasiassa ydintörmäyksien aiheuttamasta kohdeatomien värähtelyn lisääntymisestä, mutta myös elektronipysäytyksessä vapautuu energiaa, joka aiheuttaa hilavärähtelyitä. Kohteen atomien lämpöliikkeellä on oma vaikutuksensa ionien käyttökseen ja erityisesti kanavointi on erittäin herkkä hilavärähtelyille.

Tiedetään, että ioni-istutuksen aikana syntyvät kidevirheet ja -vauriot johtuvat ydintörmäyksistä, vaikkei niiden tarkkoja syntymekanismeja täysin ymmärretäkään. Vaurioiden määrä kasvaa materiaaliin osuvien ionien määrän kasvaessa ja lisäksi niistä tulee muodoltaan monimutkaisempia. Sekä säteilyvaurioiden että amorfisten taskujen tiedetään kasaantuvan pommituksen edetessä. Lopulta amorfiset alueet al-

kavat muodostua kerroksiksi. Amorfisten osien tiheys poikkeaa usein kiteestä energisten törmäysten ja sisääntulevien hiukkasten aiheuttamien muutosten takia. Nämä taskut ovat erittäin epävakaita ja uudelleenkiteytyvät paljon alemmassa lämpötilassa kuin tavalliset amorfiset alueet. Syynä tähän on taskujen suuri pinta-tilavuus-suhde ja aluetta ympäröivä kiteinen materiaali. [25]

Raskaiden ionien tapauksessa vauriot ovat lähinnä isoja virheklustereita ja amorfisia taskuja, jotka ilmeisesti syntyvät pommitusalueen sulaessa ja kiinteytyessä uudestaan [22]. Osa vaurioista korjaantuu itsestään jo huoneenlämpötilassa olevassa näytteessä, mutta myös virheiden diffuusiolla on oma merkityksensä. Kiteen tyhjien paikkojen ja välitilojen diffuusionopeuksien välillä on kahden kertaluokan ero huoneenlämpötilassa. Kidevirheiden välillä on paljon erilaisia vuorovaikutuksia, joiden merkitys lopputuloksen kannalta vaihtelee. [21, 23]

Yhtälö

$$D = \frac{1}{6} d^2 \nu_0 e^{-E_m/k_B T} \quad [23] \quad (4)$$

kuvaa Monte Carlo-diffuusiosimulaatiosta saatavaa kidevirheiden diffuusionopeutta D kuutiollisessa hilassa, joka riippuu materiaaliparametreista ja eksponentiaalisesti substraatin lämpötilan T käänteisluvusta. Esiintyvät parametrit ovat lähinaapurietäisyys d , efektiivinen yritetaajuus ν_0 ja migraatioenergia E_m .

Yhtälöstä

$$\Delta t = \frac{e}{\text{vuo} * (\text{ikkunan ala})} \quad e = 1.602176487 \times 10^{-19} \text{ C (alkeisvaraus)} \quad (5)$$

havaitaan, että keskimääräinen diffusioaika Δt on kääntäen verrannollinen tietylle alueelle tulevien ionien lukumäärään aikayksikköä kohti.

Substraattiin ammuttu ioni saattaa korvata hilassa olevan atomin tai muodostaa kohdeatomien kanssa yhdisteen, mikäli olosuhteet ovat suotuisat. Kohdemateriaaliin syntyvien vaurioiden vaikutus kanavointiin on pistevaurioiden kohdalla vähäinen, mutta amorfisten kerrosten vaikutus kanavoitumiseen on merkittävä. Amorfi-soitumismekanismeista ei ole varmaa tietoa, mutta arvellaan, että raskaiden ionien tapauksessa syynä on kiteeseen indusoituva paikallinen epävakaus (heterogeeninen amorfi-soituminen). [21, 27]

Koska ionisuihku on kohdistettu hyvin pienelle alueelle, sen paikalliset vaikutukset voivat olla merkittäviä. Ionisäteilyn korkea energia vahvistaa diffuusiota ja aiheuttaa keskitysalueelle lämpö- ja vauriopiikin, joiden suuruus riippuu ionien energiasta ja lukumäärästä sekä kohdemateriaalista. Kun ionien ja atomien energia ei enää riitä irrottamaan kiteen atomeja paikoiltaan, hilavärähtelyt alkavat lisääntyä istutuskohdan ympärillä aiheuttaen paikallisen lämpöpiikin, joka tasoittuu kun värähtelyt leviävät siirtäen lopun energian muualle kiteeseen. Lämpöpiikki saattaa johtaa jopa paikallisiin faasimuutoksiin kuten sulamiseen. Virheiden ja vaurioiden kokonaismäärä ja syvyysjakauma riippuvat ionilajista, lämpötilasta, energiasta, kokonaisannoksesta ja kanavoinnista. Ioni-istutuksen aikana kohdemateriaalissa tapahtuvia muutoksia tarkasteltaessa on huomioitava kappaleeseen kohdistuvan paineen kasvu, jolloin normaalipaineen materiaaliparametreja ei voi käyttää. [21]

Kohdemateriaalin pinnassa mahdollisesti oleva oksidi tai jokin muu ohutkalvo vaikuttaa jonkin verran ioniprofiiliin ja kohdemateriaaliin syntyviin vaurioihin materiaalista ja paksuudesta riippuen. Useimmat käytettävistä ohutkalvoista ovat amorfisia, jolloin kanavointi istutusakselin suuntaiseen pääkanavaan on pitkälti estynyt. Tästä huolimatta alikanavoinnin vuoksi ionijakauman matalan konsentraation alueet levenevät silti suhteellisen paljon, kuten kävisi jos ionisuihku osuisi kohteen pintaan viistosti. [16]

Ioni-istutuksesta seuraa myös paikallisia tilavuusmuutoksia, joiden suuruus riippuu käytetystä annoksesta. Tilavuusmuutokset ovat osin seurausta materiaaliin syntyvistä jännityksistä. Substraatin pinnasta irtoavan materiaalin vaikutus eli sputterointi on huomioitava, kun annos on riittävän suuri. Osa irronneista atomeista päätyy takaisin näytteen pinnalle. Alue amorfisoituu ennen kuin sputterointi tapahtuu [24]. Kanavoinnilla saattaa myös olla merkitystä kohteen amorfisoitumisessa [14]. Irronneiden atomien seassa on myös ioneja, joilla näytettä pommitetaan. Ionisuihkun reunat aiheuttavat muutoksia ja saastuttavat kohdemateriaalia halutun istutusalueen ulkopuolellekin jopa useiden mikrometrien säteellä riippuen käytetystä virrasta ja annoksesta.[16]

Ionien tunkeutumisvyvyys riippuu käytetystä kiihdytysjännitteestä, ionilajista ja kohdemateriaalista. Käytännössä on otettava huomioon kohteen lämpötila ja sen muutokset prosessin aikana diffuusion vaikutusten arvioimiseksi. Käytettävä annos vaikuttaa puolestaan kohteen kiderakenteeseen, jonka muutokset vaikuttavat ionien käytökseen materiaalissa. Ionisuihkun profiili ja käytettävä annos sekä pyyhkäisykertojen määrä ovat pintakuvion kannalta tärkeimmät tekijät.

2.1.2 Istutusprofiili yhteen valotuspisteeseen kohdistetulle ionisuihkulle

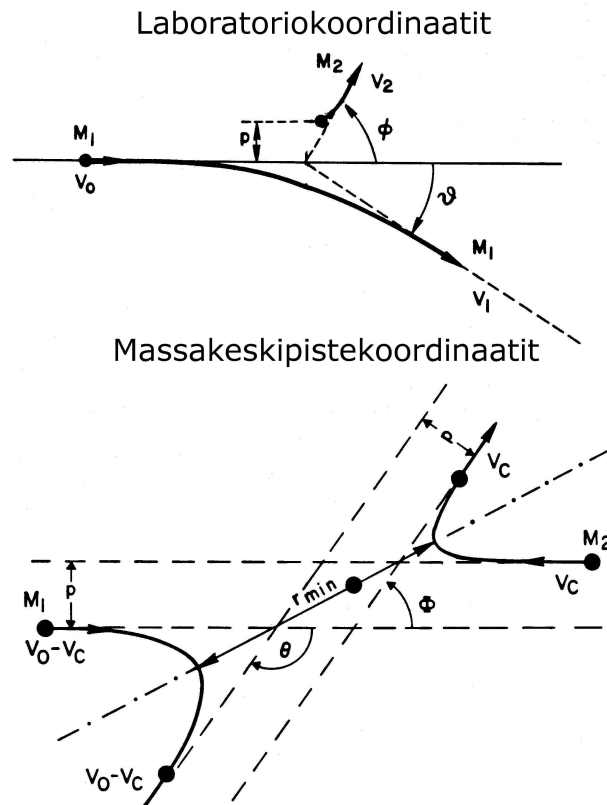
Istutusprofiilien laskemiseksi on kyettävä määrittämään ionien kulku materiaalissa. Ionien käyttäytyminen lasketaan käytännössä klassisilla malleilla, joissa tarvittavat potentiaalifunktiot ioneihin kohdistuvien voimien kuvaamiseksi saadaan Hartree-Fock-atomimallien perusteella johdettujen varausjakaumien avulla. Kohdemateriaalin atomien ja siihen päätyvien ionien välillä mahdollisesti tapahtuvien kemiallisten reaktioiden todennäköisyyttä ja merkitystä on arvioitava käyttäen fysikaalista kemiaa.

Profiilien laskemiseen käytetään yleensä numeerisia simulaattoreita, jotka perustuvat eritasoisiin klassisiin approksimaatioihin, mutta myös analyyttisiä approksimaatioita käytetään joissain yhteyksissä. Vauriomallinnus perustuu näissä menetelmissä suoraan käytettyihin approksimaatioihin, joten sen taso vaihtelee. Laskutoimituksia varten säteen muotoa approksimoidaan Gaussisella muotofunktiolla sekä oletetaan sylinterisymmetria. Lopputuloksena saadaan käytetystä menetelmästä riippuen istutusprofiili ja vaurioprofiili sekä haluttaessa ionien loppukoordinaatit. Simulaattoreita käsitellään tarkemmin osiossa 3.1.2 alkaen sivulta 24.

Käytettäessä Gaussista approksimaatiota ionisuihkun muodolle on muotofunktiota rajoitettava leveyssuunnassa. Muotofunktion katkaisukohta riippuu approksima-

tion halutusta tarkkuudesta eli on arvioitava missä kohtaa ionisuihkun intensiteetti on riittävän alhainen, jotta loppuosan katkaisusta johtuva virhe jää sallittujen rajojen sisään.

Suosituin olemassa olevista laskentamenetelmistä on binääritörmäysapproksimaatio (BCA). Siinä oletetaan, että ioni törmää vain yhteen atomiin suorittaen energiansiirron, eivätkä muut atomit vaikuta prosessiin lainkaan, minkä jälkeen ioni jatkaa matkaansa uuteen suuntaansa ja törmäystapahtuma toistuu. Koska törmäysenergiat ovat vähintään satoja kertoja kohdeatomien lämpöliikkeen energiaa suurempia, voidaan olettaa ionien törmäävän paikallaan olevaan kohteeseen. Ionien rata materiaalissa on sik-sak tyyppinen ydintörmäysten vuoksi [27]. [21]



Kuva 7: Kaavio ionin törmäyksestä kohdemateriaalin atomiin laboratorio- ja massakeskipistekoordinaatistossa. [34]

Energianmenetysmekanismit jaetaan yleensä ydin- ja elektronitörmäyksiin. Tällainen jako elastisiin ja epäelastisiin törmäyksiin on hyödyllinen ja hyvä approksimaatio, koska kumpaakin vuorovaikutustyyppiä voidaan käsitellä toisistaan riippumatta. Elastisten törmäysten käsittely onnistuu liikemäärän- ja energiansäilymlakien perusteella. Törmäysten tarkastelussa siirrytään massakeskipistekoordinaatistoon, jolloin sironnan käsittely keskusvoimakentässä helpottuu. Kuvasta 7 käyvät ilmi hiukkasten liikeradat vuorovaikutuksen aikana ja käytettyjen suureiden merkitys. Niin kauan kuin kahden hiukkasen välillä oleva voima on vain niiden välisellä suoralla, hiukkasten suhteellinen liike voidaan kuvata massakeskipistekoordinaatistossa

origoon keskittyneessä atomien välisessä potentiaalissa liikkuvalla hiukkasella. [21]

Yhtälössä

$$\vec{F}_T = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \frac{d\vec{p}_T}{dt} \quad [21] \quad (6)$$

massakeskipistekoordinaatit kahden hiukkasen järjestelmälle määritellään nollaliikemääräkoordinaatistossa, jolloin kokonaisvoima \vec{F}_T on nolla, koska kokonaisliikemäärä ei muutu.

Yhtälössä

$$\frac{1}{M_c} = \frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \quad (7)$$

määritellään redusoitu massan massakeskipistekoordinaateille, ja sitä tarkasteltaessa havaitaan, että redusoidun massan käänteisluku on vuorovaikuttavien hiukkasten massojen käänteislukujen summa.

Atomin nopeus massakeskipistekoordinaatistossa saadaan yhtälöstä

$$\vec{v}_c = v_{atom} = \vec{v}_0 \frac{M_c}{M_2}, \quad (8)$$

jossa \vec{v}_0 on ionin nopeusvektori laboratoriokoordinaatistossa ennen törmäystä.

Ionin nopeus massakeskipistekoordinaatistossa saadaan yhtälöstä

$$v_{ion} = \vec{v}_0 - \vec{v}_c = \vec{v}_0 \frac{M_c}{M_1} \quad [21], \quad (9)$$

jossa \vec{v}_0 on ionin nopeusvektori laboratoriokoordinaatistossa ennen törmäystä. Kahdesta edellisestä yhtälöstä nähdään massakeskipistekoordinaatiston etu, kun hiukkasten nopeus pysyy vakiona ja eikä riipu lopullisesta sirontakulmasta θ_c .

Toinen massakeskipistekoordinaatiston eduista systeemin kokonaisenergian E_c yhtäsuuruus alkuperäisen liike-energian kanssa

$$E_c = \frac{1}{2} M_c v_0^2 = \frac{M_2}{M_1 + M_2} E_0. \quad (10)$$

E_0 on ionin liike-energia laboratoriokoordinaatistossa ennen törmäystä.

Yhtälössä

$$T = T_M \sin \frac{\theta_c}{2} \quad (11)$$

esitetään törmäyksessä siirtyvän energian määrä sirontakulman θ_c (kuvassa 7 θ) funktiona, jonka havaitaan olevan suoraan verrannollinen sirontakulman puolikkaan siniin.

Suurin mahdollinen törmäyksessä siirtyvä energiamäärä riippuu yhtälön

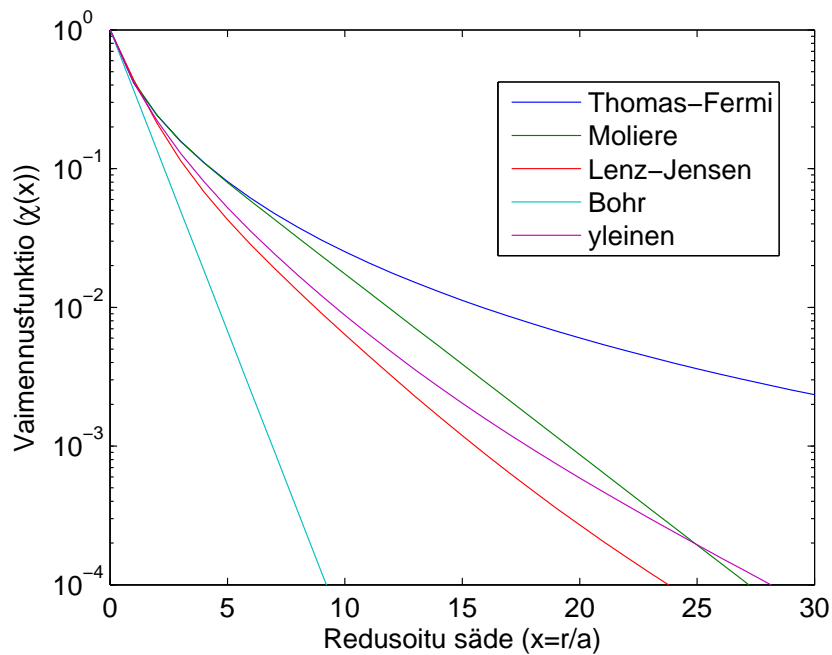
$$T_M = \frac{4M_1M_2}{M_1 + M_2} E_0 = \gamma E_0 \quad [21] \quad (12)$$

mukaan törmäyvien hiukkasten massoista saatavasta vakiokertoimesta γ ja E_0 :sta.

Kahden hiukkasen välisessä siroonnassa tapahtuva liikeradan muutos saadaan yhtälön

$$\theta_c = \pi - 2b \int_0^{1/r_{min}} \frac{du}{[1 - \frac{V(u)}{E_c} - (bu)^2]^{1/2}} \quad u = 1/r \quad (13)$$

klassisesta sirontaintegraalista, jota ei kyetä ratkaisemaan analyyttisesti kuin yksinkertaisille potentiaaleille $V(r)$. Jossain tapauksissa voidaan käyttää Coulombin potentiaalia; atomeille tämä on mahdollista niiden välisen etäisyyden ollessa huomattavasti pienempi kuin Bohrin säde eli ydinten välisten sähköisten vuorovaikutusten vallitessa. Tavallisesti joudutaan turvautumaan numeerisiin menetelmiin integraalin ratkaisemiseksi. Ioni-istutuksessa esiintyvien vuorovaikutusten suuri lukumäärä edellyttää törmäyksissä siirtyvän energian määrän tai sirontakulmien laskemista tilastollisia menetelmiä ja todennäköisyyksiä käyttäen. [21]



Kuva 8: Redusoitujen vaimennusfunktioiden χ_I , χ_U käyrät; r =etäisyys kohdeatomista, a =vaimennusetäisyys=vakio.

Laskelmissa tarvittavan potentiaalien määrittämiseksi on tunnettava kiinteän aineen varausjakaumat eri atomilajeille. Haluttu analyyttinen potentiaalifunktio saadaan valitsemalla edustava joukko atomien välisiä potentiaaleja, joihin sovitetaan eksponenttifunktioiden sarja. Yhtälössä

$$\chi_I(r) = \frac{V(r)}{(Z_1 Z_2 e^2 / r)} \quad e = \text{alkeisvaraus} \quad [21] \quad (14)$$

on vaimennusfunktion määritelmä, josta havaitaan että vaimennusfunktio määritellään etäisyydellä r atomin todellisen potentiaalın ja Coulombin potentiaalın suhteena. Kuva 8 esittää neljä klassista Thomas-Fermi-atomiin perustuvaa vaimennusfunktiota χ_I sekä kvanttimekaniikkaan perustuvan yleisen vaimennusfunktion χ_U

samaan kuvaan piirrettyinä. Jotta saatava yleinen potentiaalfunktio toimisi, on siinä käytettävä redusoitua koordinaattijärjestelmää, jossa redusoitu säde on kyseisten atomien järjestyslukujen funktio. [34]

Käytännön laskentaa varten sirontaintegraali korvataan jollain analyyttisellä tai numeerisella approksimaatiolla. Littmark ja Ziegler ovat kehittäneet tehtävään spline-funktion, joka kuvaa suoraan yleisellä vaimennusfunktiolla (universal screening function) laskettuja arvoja yli viidentoista kertaluvun alueelta alle yhden prosentin virhemarginaalilla. Saatava funktio on muunnettava todelliseksi potentiaaliksi laskutoimituksia varten käyttämällä redusoitua sädettä.

Yhtälössä

$$\chi_U = 0.1818e^{-3.2x} + 0.5099e^{-0.9423x} + 0.2802e^{-0.4028x} + 0.02817e^{-0.2016x} \quad [21] \quad (15)$$

näkyä redusoidun universaalin vaimennusfunktion (ZBL) kaava redusoidun säteen x funktiona.

Yhtälöstä

$$x = \frac{r}{a_U} \quad (16)$$

havaitaan, että redusoitu säde ZBL-funktiolle saadaan jakamalla säde r vaimennusetäisyydellä a_U .

Yhtälö

$$a_U = \frac{0.8854a_0}{(Z_1^{0.23} + Z_2^{0.23})} \quad (17)$$

esittää vaimennusetäisyyttä ZBL-funktiolle järjestyslukujen Z_1 ja Z_2 funktiona.

Raskaiden ionien energianmenetys elektroneille jaetaan kolmeen kategoriaan: hitaat ionit (<25 keV/amu), nopeat ionit (>200 keV/amu) ja keskinopeat ionit (25-200 keV/amu). Hitailla ioneilla energian menetys on yleensä verrannollinen ionin nopeuteen, kun taas nopeilla ioneilla pysäytysvoimat saadaan skaalaamalla protonien pysäytysvoimia ionin järjestysluvun ja efektiivisen varauksen tulon neliöllä. Efektivistä varausta kuvaava termi voidaan estimoida Thomas-Fermi-atomin atomiteorian avulla. Thomas-Fermi-atomin perusskaalaussääntöjen mukaan varaustiheys on suoraan verrannollinen ydinvarauksen Z neliöön. Keskinopeiden ionien teoria on monimutkaisempi, lisäksi sen on luonnollisesti sidottava alhaisen ja korkean nopeusalueen tulokset toisiinsa. [34]

Tässä työssä käytettiin vain hitaita ioneja, joilla energianmenetystä elektroneille mallinnetaan käyttämällä vapaaelektronikaasua ja ENR (Echenique, Nieminen, Ritchie)-lähestymistapaa. Laskennan nopeuttamiseksi ionin varaustilan ja efektiivisen nopeuden välistä suhdetta kuvataan empiirisellä funktiolla. [34]

Ziegler, Biersack ja Littmark olettivat elektronien pysäytysvoimien laskemiseksi, että kohteen elektronitiheys vaihtelee hitaasti paikan funktiona. Elektronien energiatasoa ja siirtymien voimakkuuksia kiinteässä aineessa kuvataan vapaaelektronikaasun arvoilla. Kohtemateriaalin kiellettyyn energiaväliin liittyviä efektejä kuvataan valitsemalla sopiva (virtuaalinen) Fermi-nopeus. Ionisoitumisaste puolestaan riip-

puu vain ionin suhteellisesta nopeudesta kohteen Fermi-nopeuteen nähden. Riip-puen 'törmäysetäisyydestä' elektronien energianmenetystä kuvataan joko Lindhar-tin tai Barndtin ja Kitagawan teorialla. Suurilla etäisyyksillä käytetään Lindhartin vapaaelektronikaasuteoriaa, jossa varattujen hiukkasten vuorovaikutuksia kuvataan 0 K:ssa olevan elektronikaasun perturbaatioilla sisällytettynä paikalliseen tiheysap-proksimaatioon hiukkasen ja kiinteän aineen väliselle vuorovaikutukselle. Lähitör-mäyksissä elektronien energianmenetystä raskaille ioneille kuvataan Barndtin ja Ki-tagawan (BK) teorialla. BK-teoriassa ionin varaustila vastaa ionisoitumisastetta, mikä on myös efektiivinen varaus tapauksille, joissa elektronit ovat ionin säteen ul-kopuolella. Tapauksille, joissa elektronit tunkeutuvat ionin elektroniverhon sisään, efektiivinen varaus saadaan ionin varaustilasta kiinteässä aineessa korjattuna lisään-tyneitä vuorovaikutuksia vastaavalla lisätermillä. Näin saatua efektiivivistä varausta käytetään protonien pysäytysvoimien skaalaamiseksi raskaille ioneille. [34]

2.1.3 Useasta valotuspisteestä tulevat efektit

Käyttökelpoisen kuvion teko vaatii useiden valotuspisteiden käyttöä, joiden on käy-tännössä mentävä päällekkäin. Mitä ilmiöitä päällekkäin menevillä alueilla esiintyy, riippuu käytettävän annoksen suuruudesta ja päällekkäisyysasteesta. Tiedetään että edellisen pisteen käsittely on aiheuttanut käsiteltävälle alueelle erilaisia kidevirheitä ja -vaurioita. Päällekkäisyyden vuoksi kaikki muut kohdat paitsi kuvion ulkoreu-nat saavat lisäannoksen viereisen valotuspisteen alueelle, mikä yhtenäistä kuviota tehtäessä takaa suurinpiirtein saman annoksen koko alueelle. Päällekkäisyysasteeksi voidaan yleensä olettaa 50 %, mutta kehitettävän menetelmän tulee toimia myös yleisessä tapauksessa.

Materiaalissa jo ennestään olevien ionien merkitys lisäannoksessa tulevien ionien kulkeutumisessa on vähäinen verrattuna kidevirheiden ja -vaurioiden vaikutukseen, jos kohdemateriaalin atomitiheys on muutaman kertaluvun ionitiheyttä suurempi. Jos ionitiheys on riittävän suuri ($\sim 1/10 \times$ atomitiheys), voi se aiheuttaa merkit-täviä muutoksia tulevien ionien näkemässä kohteessa, jolloin nämä on huomioitava kidevirheiden ja -vaurioiden ohella.

2.2 Ioni-istutuksen käyttö etsauksen hallinnassa

Etsausprosessi on yleensä selektiivinen seostuksen suhteen, joten seostettu alue voi toimia etsausmaskina. Ei tiedetä tarkkaan, miksi riittävä seostus estää syöpymisen etsatessa, vaikka on esitetty, että syynä olisi ioni-istutuksen aiheuttama jännitys [28]. Pintakemia ja erityisesti galliumin oksidoituminen etsausprosessin aikana ovat oleellisia tekijöitä etsausnopeuden alenemisessa vahvasti Ga-seostetussa amorfisessa piissä [26]. Annos-etsausaika käyrästä saadaan kriittinen annos maskiefektille, kun haluttu etsausvyvyys tunnetaan.

Maskiefektiin vaadittavan seostuksen määrä riippuu käytetystä etsausprosessista ja ioni-lajista. Seostus tehtiin aikaisemmin diffuusiolla käyttäen substraatin pintaan kas-

vatettua oksidikerrosta kuviointiin. Nykyisin tehtävään käytetään ioni-istutusta sen paremman hallittavuuden vuoksi. Rakenteiden koon pienetessä satoihin nanometreihin ja tämän alle ioni-istutuksen suorittamisesta fokusoidulla ionisuihkulla tulee kaikkein käyttökelpoisin menetelmä. Fokusoidun ionisuihkun käyttö yksinkertaistaa etsausmaskintekoprosessia huomattavasti, koska perinteisessä ioni-istutuksessa tarvittavan suoja/kuviointikerroksen käytöstä voidaan luopua. [26]

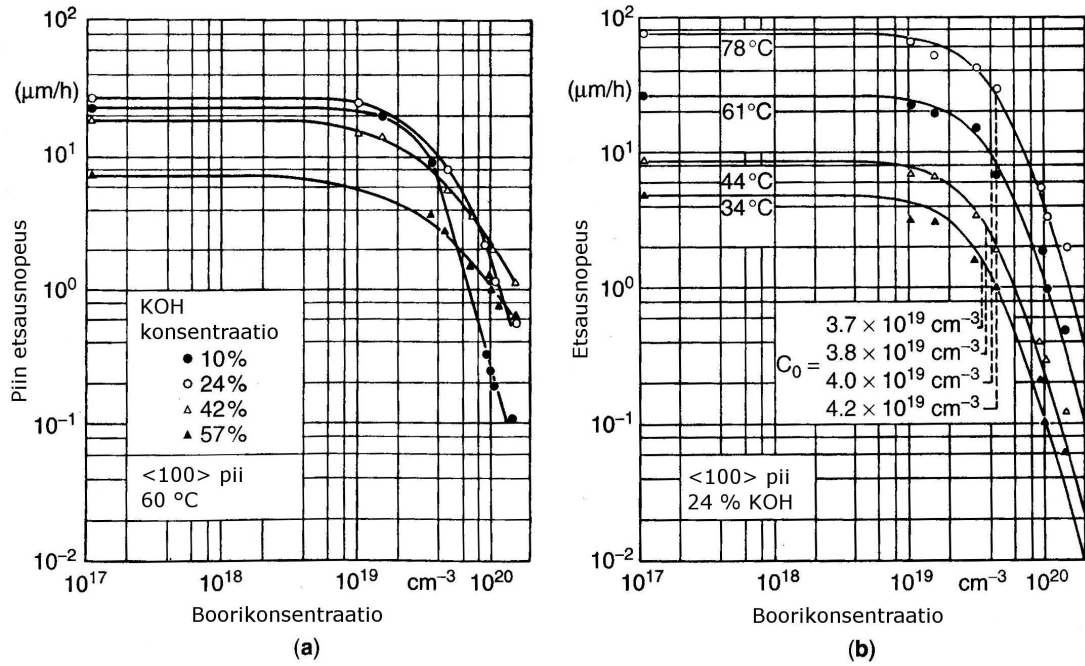
Jossain tapauksissa myös etsausmaskin tekoon käytetyn ioni-istutuksen jälkeen on suoritettava lämpökäsittely seostuksen sähköiseksi aktivoimiseksi ja istutusvaurioiden korjaamiseksi. Lämpökäsittelyyn liittyvää diffuusiota pyritään hillitsemään käyttämällä lyhyitä käsittelyaikoja ja nopeaa kuumennusta jopa satoihin asteisiin eli RTA (rapid thermal annealing)-menetelmää, sillä diffuusion merkitys kasvaa käsittelyajan pidentessä. [26]

Maskin ominaisuudet muuttuvat prosessin aikana, mutta käytettävästä prosessista riippuu miten ja miksi. Tapahtuvat muutokset eivät juurikaan vaikuta saatavaan etsausprofiiliin, mutta niillä voi olla merkitystä myöhemmän prosessoinnin kannalta. Seostusatomit voivat reagoida etsauskemikaalien tai -kaasujen kanssa muodostaen lähinnä oksideja, jotka jäävät kohteen pintaan. Joissakin tapauksissa etsausprosessi jättää seostusatomit rauhaan ja vain substraatin atomit osallistuvat reaktioihin jolloin seostuskonsentraatio kasvaa. Reaktiot tapahtuvat melkein aina maskin pintakerroksissa, mutta joitain ioneja ja radikaaleja voi tunkeutua syvemmälle. Etsausprosessin aikana voi tapahtua myös diffuusiota, mutta lämpötilojen ollessa melko alhaisia sen merkitys on vähäinen. [26]

Seostuksen käyttö maskina aiheuttaa ongelmia joidenkin laitteiden valmistusprosesseille, sillä mikroelektroniikkaa voidaan valmistaa vain tietyllä tavalla seostettuihin substraatteihin. Mikromekaniikan kannalta vahvasta seostuksesta aiheutuva mekaanisten ominaisuuksien heikkeneminen voi nousta ongelmaksi.



Kuva 9: Poikkileikkaus seostetusta kuviosta ennen (ylempi) ja jälkeen (alempi) etsauksen, vasemmalla isotrooppinen märkäetsaus ja oikealla ICP-RIE-etsaus. Seostettua aluetta kuvataan keltaisella värillä.



Kuva 10: Piin annos-etsausnopeuskäyrät KOH:lle. [8]

2.2.1 Maskiefekti märkäetsauksessa

Ioniseostus toimii maskina useimmille kemikaaleille, mutta jotkut etsauskemikaalit syövyttävät seostettua eivätkä puhdasta aluetta. Vaikka märkäetsaukseen liittyvät kemiallis-fysikaaliset prosessit tunnetaan melko hyvin, ioniseostuksen maskiefektin syistä on olemassa vain arvioita. Joissain tapauksissa seostus kasvattaa etsausnopeutta, näin esimerkiksi pii- tai germanium-ioneilla seostetun piioksidin etsaus HF:llä [28]. Elektroniprosessien merkitystä etsausnopeuden hidastumisessa liittyen korkeaan aukkokonsentraatioon lähellä pintaa amorfisessa piissä ei voida täysin sulkea pois [26]. Mikromekaniikassa käytetään usein vahvaa p++-tason ($> 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) boori-seostusta ja KOH-etsausta kiekkojen tehtävien rakenteiden valmistuksessa (bulk microfabrication). Kuvassa 10 on esitetty annos-etsausnopeuskäyrät KOH:lle, joista nähdään kuinka etsausnopeus pysyy vakiona tiettyyn pisteeseen asti ja alkaa sen jälkeen laskea nopeasti. [8]

2.2.2 Maskiefekti ICP-RIEssä

Aikaisempien tulosten perusteella tiedetään, että vähintään kriittisen annoksen saaneet alueet piissä eivät syövy juuri ollenkaan ICP-RIE-prosessin aikana. Koska edes ICP-RIEn toiminnan taustalla olevia fysikaalisia ja kemiallisia prosesseja ei tunneta kunnolla ei ioniseostuksen maskiefektin syistä voi sanoa juuri mitään. ICP-RIEssä käytettävästä SF_6/O_2 -kaasuplasma peräisin oleva atominen happi muodostaa prosessin aikana seostuksessa olevien gallium-ionien kanssa reagoimalla galliumoksidia, jonka stoikiometriä muuttuu etsausajan funktiona ja lienee osasyynä

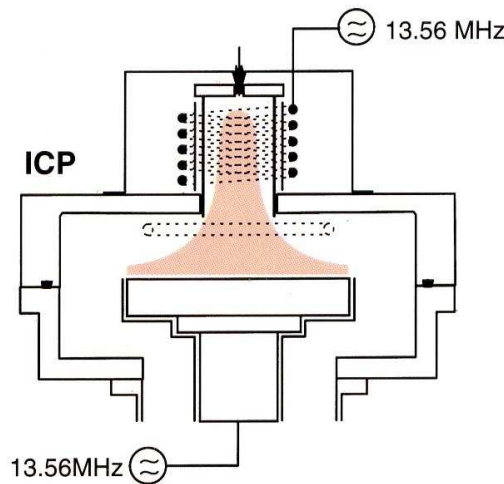
Taulukko 1: Etsausnopeuksien suhde (seostamaton/seostettu) galliumseostetulle piille annoksen funktiona. [28]

annos	etsausnopeuksien suhde seostamaton/seostettu
$1.59 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$	1.08
$1.59 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$	2.56
$1.59 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$	1.59

maskiefektiin [26]. Erään tutkimusryhmän mukaan gallium-ioneilla seostetun piin etsausnopeus DRIellä laskee tiettyyn annokseen asti ja kääntyy sen jälkeen nousuun, kuten taulukosta 1 käy ilmi. Kuvassa 9 olevia etsausprofiilien poikkileikkauksia tarkastelemalla nähdään että isotrooppinen märkäetsaus etsaa myös maskin alta, mutta ICP-RIEn avulla saadaan aikaan suora seinämä. [28]

2.3 ICP-RIE–etsausprosessin toiminta ja ominaisuudet

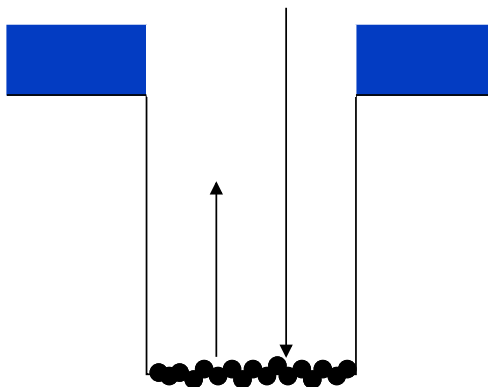
ICP-RIE–prosessissa prosessikammiossa oleva käsiteltävä kappale painetaan sen paksuudesta riippuvalla voimalla alapinnastaan kiinni elektrodiin, jota jäähdytetään nesteheliumilla tai -tyypellä käytettävästä laitteistosta ja prosessista riippuen. Prosessikammion paine on pidettävä alle kymmenessä millitorrissa, jotta ionit osuisivat kohteen pintaan suorassa kulmassa. Mikäli paine nousee yli sallitun rajan, ionien törmäykset kammiossa olevien kaasumolekyylien kanssa saavat aikaan ionien suunnanmuutoksia ja ionien kulmajakauma kohteen pinnan suhteen levenee. Prosessikaasujen virtaus ei saa nousta liian suureksi tai prosessikammion paine nousee yli edellä mainitun 10 millitorrin rajan. [17]



Kuva 11: Kaavio ICP-RIE–reaktorista [13].

ICP-RIE–prosessissa käytetään kahta erikseen säädettävissä olevaa tehonlähdettä. ICP:llä (induktiivisesti kytketty plasmalähde) saadaan aikaan plasman korkea

radikaali- ja ionitiheys, koska sen kehittämä voimakas RF-kenttä ionisoi, virittää ja hajottaa reaktiokaasujen molekyylejä ja atomeja. CCP:llä (kapasitiivisesti kytketty plasmalähde) puolestaan ohjataan plasmassa olevat ionit ja radikaalit kohteen pintaan, joten sen tehoa säättämällä hallitaan pintaan kohdistuvan ionipommituksen voimakkuutta. Kuvassa 11 oleva kaavio havainnollistaa ICP-RIE-reaktorin rakennetta. Korkeilla ICP:n tehoilla etsausnopeus alkaa kasvaa lineaarisesti SF_6 -virtauksen funktiona.



Kuva 12: Kryogeeninen DRIE-prosessi. Kuvassa olevat nuolet kuvaavat substratin pintaan osuvia reagensseja (mustat ympyrät) ja pinnasta irtoavia reaktiotuotteita. Etsausmaskia kuvataan sinisellä värillä.

ICP-RIE-etsausprosessin toiminta perustuu plasmassa olevien radikaalien ja ionien reaktioihin kohdemateriaalin atomien kanssa. Kaasuuntuvat reaktiotuotteet kuljetavat reagoineet kohdemateriaalin atomit pois etsattavan kohteen pinnalta. Etsausreaktio voi tapahtua vain, jos reaktion lopputuotteen atomien välinen sidos on vahvempi kuin kohdemateriaalin atomien väliset sidokset. Matalissa lämpötiloissa kohteen pintaan osuvilla ioneilla ja radikaaleilla ei ole riittävästi lämpöenergiaa reaktion aktivointienergian ylittämiseksi, jolloin etsausprosessin vaatima reaktio voi tapahtua vain törmäyksessä saatavan energian avulla. Tällöin sivuseinillä ei voi tapahtua etsausreaktioita, vaikka niihin saattaakin muodostua passivointikalvo ja saatava profiili on suorakaiteen muotoinen. Kuvassa 12 havainnollistetaan edellä kuvattua kryogeenisen DRIE-prosessin ideaa. Ionipommituksella voidaan myös aiheuttaa reaktioita, jotka eivät normaalisti sovellu etsaukseen. [8]

Kidesuunnista riippuva etsaus vaatii sen, että kokonaisreaktionopeus määräytyy pitkälti pintareaktioiden nopeudesta. Kuljetusprosessit voivat kätkeä edellä kuvatun ilmiön. Mahdollisen maskin alle-etsaantumisen voi minimoida käyttämällä sopivia prosessiparametrejä. Käytännössä tämä tarkoittaa etsausnopeuden alentamista. Selektiivisyyteen maskimateriaalin suhteen vaikuttavat lähinnä käytetyt prosessikaasut ja niiden osuudet kokonaisvirtauksesta sekä CCP:n teho.

Etsausprofiilin hallinta on tasapainoilua etsauksen ja passivoivan SiO_xF_y -kerroksen kasvatuksen välillä. Etsausprofiili käyttäytyy samalla tavalla sekä SF_6 - ja O_2 -virtauksen että ICP- ja CCP-parametrien suhteen funktiona. ICP-RIEn kyky tehdä suoria seinämiä ei-kryogeenisissa lämpötiloissa johtuu pitkälti kohteen pintaan syntyväs-

tä passivointikerroksesta, joka suojaa muita kuin ionipommituksen kohteena olevia alueita kemiallisilta reaktioilta. Passivointikerros syntyy kun SF_6 - ja O_2 -radikaalit reagoivat kohdemateriaalin atomien kanssa. Plasmaetsaukselle ei ole olemassa käyttökelpoisia simulaattoreita lopputuloksen ennustamiseen lähtien tunnetuista prosessiparametreista, koska kaikkia prosessimekanismeja ei tunneta riittävästi [8]. [17]

Yhtälössä

$$ER_{Si}(Q, P) = \frac{\alpha Q_{SF6} * \beta P_{ICP}}{\alpha Q_{SF6} + \beta P_{ICP}} \quad [17] \quad (18)$$

esitetään empiirinen lauseke piin etsausnopeudelle ICP-RIEssä SF_6 -virtauksen (Q_{SF6}) ja ICP:n tehon (P_{ICP}) funktiona. Etsausnopeuden käännteisluvun havaitaan olevan osoittajassa olevien tulontekijöiden käännteislukujen summa. Etsausnopeuden voi pitää vakiona muuttamalla molempia prosessiparametreja sopivassa suhteessa. Suhteellisen pienillä SF_6 -virtauksilla erityisesti isoilla ICP:n tehoilla etsausnopeuden havaitaan kasvavan lineaarisesti SF_6 -virtauksen funktiona. Tämän suoran kulmakerroin on α . Suurilla SF_6 -virtauksilla etsausnopeus kasvaa lineaarisesti ICP:n tehon funktiona. Tämän suoran kulmakerroin on β . Vakiot α ja β ovat laitekohtaisia parametreja, jotka on määritettävä kokeellisesti. [17]

3 Testausmenetelmät

Tässä työssä tutkitaan ioni-istutusprofileja sekä pinta- että 3D-kuvioita. Ioni-istutusprofilien tutkimiseen ei kokeellisia menetelmiä ole ollut käytettävissä ja niiden käyttökelpoisuuskin tämän työn kannalta on huono. Simulaattorit puolestaan kykenevät tarjoamaan monipuolista aineistoa ioni-istutus- ja vaurioprofileista kohdemateriaalissa. Pinta- ja 3D-kuvioiden tutkiminen on tämän työn tärkein tavoite. Niiden tutkimiseen on lukuisia menetelmiä, joiden käytettävyys vaihtelee, mutta elektronimikroskooppi on osoittautunut käyttökelpoisimmaksi.

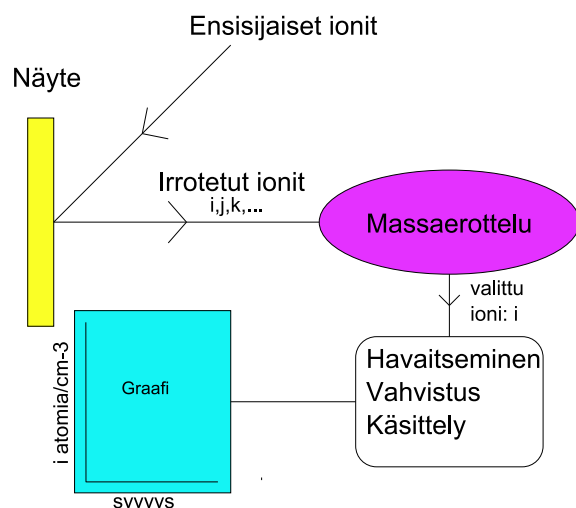
3.1 Ioni-istutusprofilit

Ioni-istutusprofileja voidaan tutkia joko laskennallisin menetelmin eli simuloimalla tai kokeellisesti. Kokeet tuottavat tarkkaa tietoa lähinnä syvyysjakaumasta ja pinnan epäpuhtaustasosta, mutteivät kykene antamaan juuri mitään tietoa ionien 3D- tai pintajakaumasta. Kokeiden pääasiallinen käyttötarkoitus on kerätä tausta-aineistoa ja vertailupohjaa simulaattoreille, joilla seostusprofileja lasketaan. Myös tuotekehitykseen, tutkimukseen ja virheenetsintään liittyvät mittaukset tulevat kyseeseen.

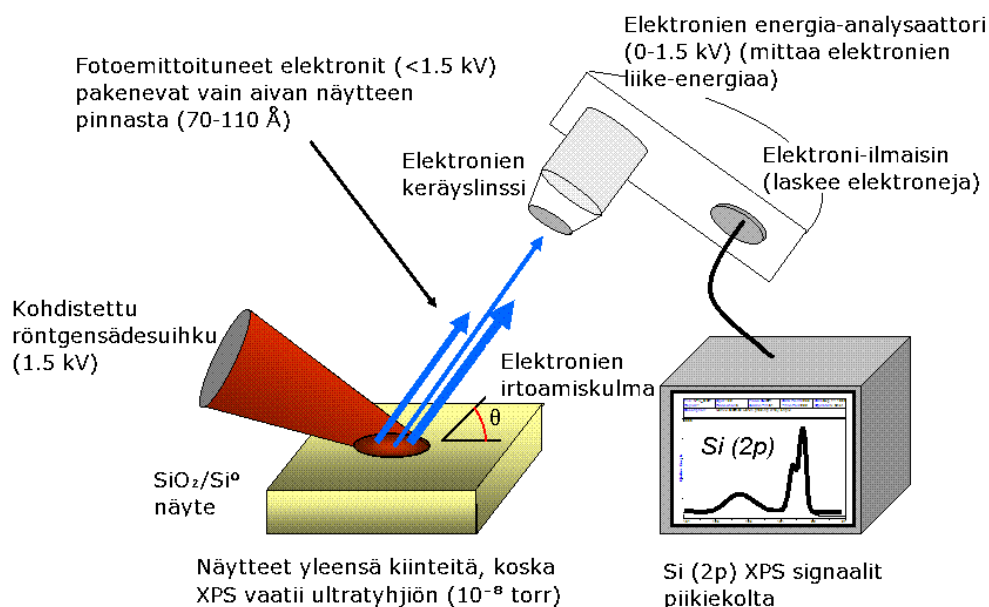
Kokeiden suurin ongelma liittyy näytteen vaurioitumiseen, sillä syvyysprofilin tutkiminen edellyttää näytteen atomien irrottamista kerroksittain. Useiden erilaisten istutusprofilien tutkiminen on käytännössä hoidettava simuloimalla, koska seostus ja mittaukset pitäisi suorittaa erikseen jokaiselle parametrijoukolle. Simulaattoreilla voidaan myös päästä parempaan tarkkuuteen kuin kokeilla, joita rajoittaa ilmaisimien herkkyys. Seostusprofiili saattaa myös muuttua tai sen muodostavat ionit voivat reagoida kokeiden aikana pilaten mittauksen. Tässä työssä käytettiin vain simulaattoreita, koska kokeellisia menetelmiä ei ollut käytettävissä.

3.1.1 Kokeelliset menetelmät

SIMS (Secondary ion mass spectrometry, sekundaari-ionimassaspektrometria) on lähinnä seostusionien syvyysjakauman määrittämiseen tarkoitettu menetelmä, jossa näytteen pinnasta irrotetaan atomeja massaspektrometrille kerros kerrokselta ionisuihkulla. Kuvasta 13 käy ilmi SIMS-mittauksen toimintaperiaate lohkokaaaviotasolla. Kyseessä on tarkka menetelmä, jolla voidaan havaita parhaimmillaan ionikonsentraatioita 10^{12} cm^{-3} :stä ylöspäin. Maksimisyvyys SIMSille on noin 100 nm. SIMS on käytetyin kokeellisista menetelmistä seostusprofilien tutkimisessa. Atomien irrottamiseen näytteen pinnasta käytettävällä ionisuihkulla voi olla muitakin vaikutuksia, jotka riippuvat kohdemateriaalista ja sen seostuksen tyypistä sekä pommittavasta ionilajista. Mahdollisiin vaikutuksiin kuuluvat kemialliset reaktiot kohteen ja ionisuihkun atomien välillä, jolloin näytteeseen voi syntyä erilaisia kerroksia, jotka sotkevat mittauksen. SIMS ei kykene kunnolla mittaamaan jyrkkiä profileja, koska ne leviävät ionisuihkun ja hilan atomien välisten vuorovaikutusten vuoksi. [17, 25]



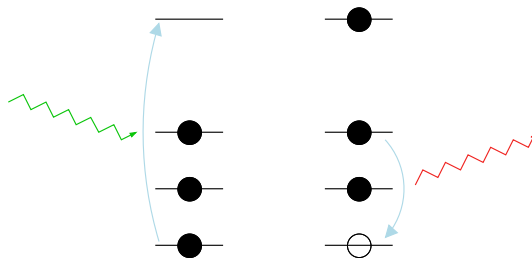
Kuva 13: Periaatekaavio SIMS-mittauksesta.



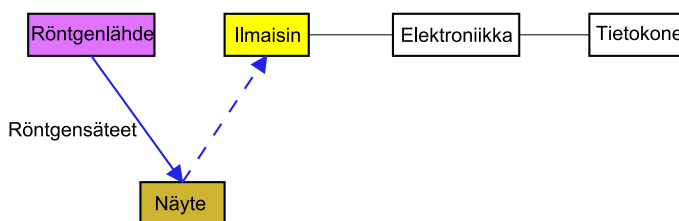
Kuva 14: Kaavio XPS-mittauksesta. [33]

Muitakin spektroskopiamenetelmiä käytetään tutkittaessa materiaalien pintakerrosten atomikoostumusta. XPS (X-ray photoelectron spectroscopy, röntgensädefotoelektronispektroskopia)-menetelmässä, joka tunnetaan myös nimellä ESCA (Electron Spectroscopy for Chemical Analysis, elektronispektroskopia kemialliseen analyysiin), näytettä pommitetaan röntgensäteillä. Tällöin näytteen pintakerroksesta (1-10 nm) irtoaa elektroneja, joiden energia ja lukumäärä mitataan. Kuvassa 14 on lohkokaaviotason esitys XPS-mittauksesta. XPS tunnistaa näytteessä olevat alkuaineet ja niiden välisten sidosten tyyppien irronneiden elektronien sidosennergian perusteella ja alkuaineiden suhteelliset osuudet saadaan puolestaan elektronien lukumääristä. XPS muiden PES (fotoelektronispektroskopia)-menetelmien tavoin perustuu

valosähköiseen ilmiöön eli UV- tai röntgenalueen fotonit irrottavat näytteestä elektroneja. [2]



Kuva 15: XRF-mittauksen fysikaalinen perusta. Atomi absorboi fotonin jolloin sen alimmalla energiatilalla oleva elektroni nousee viritystilalle. Seuraavaksi atomi emittoi absorboitua matalampienergisemmän fotonin kun elektroni joltain ylemmältä energiatilalta siirtyy alimmalle energiatilalle.



Kuva 16: Periaatekaavio EDX-mittauksesta.

XRF (X-ray fluorescence, röntgensädefluoresenssi)-menetelmissä, joihin myös EDXkin (Energy dispersive X-ray spectroscopy, energiadispersiivinen röntgensäde-spektroskopia) kuuluu, näytteen atomit viritetään korkeaan energiasäteilyllä tai gammasäteillä ja niiden emittoimaa karakteristista röntgensäteilyä mitataan. Kuva 15 esittää XRF-mittauksen periaatteena olevan fluoresenssin fysikaalista periaatetta. Kuvassa 16 on esitetty lohkokkaavio EDX-järjestelmästä. Näytteen alkuaikoinen koostumus saadaan XRF-menetelmissä karakteristisen röntgensäteilyn spektristä. [11, 12]

Sekä PES- että XRF-menetelmiä voidaan käyttää ioni-istutuksen lopputuloksen tutkimiseen, mutta näistä PES-menetelmät ovat sopivampia. Sekä XRF- että PES-menetelmät on tarkoitettu lähinnä näytteen pinnan alkuaikoinen koostumuksen määrittämiseen, mutta kumpikaan menetelmä ei kykene havaitsemaan keveimpiä alkuaikoinen. XRF-menetelmä ei yleensä kykene tunnistamaan natriumia keveämpiä alkuaikoinen, kun taas XPS-menetelmä kykenee tunnistamaan kaikki alkuaikoinen litiumista lähtien. XRF-menetelmä antaa tietoa näytteen koostumuksesta yleensä muutaman mikrometrin syvyyteen asti, kun taas XPS-menetelmä rajoittuu yleensä noin kymmenen nanometriin. XPS ei voi täysin korvata SIMSiä ioniprofiilien tutkimisessa, koska sen tarkkuus (~ 0.1 atomi-%) ei riitä. [11]

Rutherfordin takaisinsirontaspektroskopia (RBS) havaitsee parhaiten raskaat atomit kevyistä atomeista koostuvassa atomihilassa. Menetelmässä kohdetta pommitetaan

yleensä 1–3 MeV:n keveillä ioneilla (H, He, Li), mutta alfa-hiukkasia ja protonejakin voidaan käyttää. Kohteeseen ammutut ionit osallistuvat erilaisiin törmäystapahtumiin menettäen energiaansa kohdemateriaalin atomeille. Ionin ja atomin välisessä törmäyksessä sirontakulmat ja sironneen ionin energia ovat ominaisia kullekin ioni-atomiparille. Kohteen alkuainekoostumuksen syvyysriippuvuus aina yhden mikrometrin syvyyteen asti kyetään määrittämään takaisinsironneiden ionien energijakaumasta. Ionisuihkun energia valitaan siten, ettei ydinreaktioita voi tapahtua. [9, 17]

3.1.2 Simulaattorit

Ioni-istutuksen simulointiin käytetään yleensä Monte Carlo (MC)-menetelmiä niiden laskennallisen tehokkuuden vuoksi, mutta tietyissä olosuhteissa on turvauduttava klassista molekyyliidynamiikkaa (MD) käyttäviin simulaatioihin (MD-simulaattorit). Simulaattorit käsittelevät ionisoitumisen ja elektronien virittymisen vain energian menetyksenä, jolla ei ole vaikutusta törmäysdynamiikkaan. Tällainen approksimaatio voidaan tehdä, jos energian siirto elektroneille on pieni verrattuna liike-energian siirtoon atomien välillä tai havaittavaa 'kimpoamista' ei tapahdu. Vain MD-simulaattoreilla kyetään edes jollain tasolla mallintamaan, mitä todella materiaalisissa tapahtuu, mikä tekee niistä liian laskentaintensiivisiä moniin tapauksiin. [21]

Käytettävät mallit puolestaan vaativat usein monia empiirisiä parametreja, joilla malli sovitetaan tutkittavaan tapaukseen, mutta yleensä nämä löytyvät valmiina simulaattoriohjelmasta. Osa simulaattoreista käyttää tilastollisia menetelmiä, jolloin välttyään laskemasta tiettyjä arvoja kaikille mahdollisille vuorovaikutuksille. Melkein kaikki simulaattorit käyttävät niin sanottuja superioneja eli jokainen simuloitava ioni edustaa suurta osaa annoksesta. Tällä pystytään nopeuttamaan laskentaa tarkkuuden pahemmin kärsimättä. Simulaattoreissa käytetään usein erilaisia painofunktioita laskennan nopeuttamiseksi. [23]

Simulaattoreista saatavaa ionijakaumaa voidaan käyttää lähtödatana erilaisissa analyysissä. Käytännössä saatu jakauma sovitetaan johonkin tunnettuun jakaumafunktion, jota käytetään jatkoanalyysiin. Ioni-istutussimulaattorit integroidaan usein prosessisimulaattoreihin.

MD-simulaattorit

Vaikkeivät MD-simulaattorit huomioikaan kvanttiefektejä, niillä kyetään saamaan riittävän hyvää vertailudataa MC-simulaattorien käyttökelpoisuuden tutkimiseksi ja laajentamiseksi. Saatua dataa voidaan käyttää myös MC-simulaattorien parantamiseen. Klassinen molekyyliidynamiikka toimii niin kauan kuin kvanttiefektit ja suhteellisuusteoreettiset korjaukset voidaan jättää huomiotta. Myös MD-simulaattorit käyttävät potentiaaleja vuorovaikutusten kuvaamiseen ja usein samat potentiaalfunktiot käyvät MC-simulaattoreihin pienin muutoksin. [21]

On olemassa useita tapoja vähentää MD-simulaattorien laskentaintensiivisyyttä.

Yleensä kyse on niin sanotusta 'harvinainen tapahtuma' (rare event)-algoritmista, joka käyttää 'atomijako' (atom splitting)-menetelmää profilin syvän komponentin näytteistykseen lisäämiseksi tai periodisista reunaehdoista [15, 18]. MD-simulaation avulla kyetään mallintamaan suoraan myös kanavoitumista sekä kidevaurioita. MD-simulaattoreilla voi myös tutkia matalaenergisten (alle 100 eV) ionien käyttäytymistä materiassa, mihin MC-simulaattorit eivät juuri koskaan pysty.

MC-simulaattorit

Erilaisia Monte Carlo -simulaattoreita on raportoitu suuri määrä, mutta useimmat niistä ovat muutaman perustyyppin johdannaisia ja perustuvat binääritörmäysap-proksimaatioon (BCA). BCA on yleensä käyttökelpoinen sadasta elektronivoltista useisiin megaelektronivoltteihin, vaikkakin erittäin harvat simulaattorit kykenevät tarkastelemaan koko aluetta, sillä useimmat käytetyistä potentiaalimalleista eivät päde koko energia-alueella.

Vauriomallinnus ja kanavoinnin kuvaus on toteutettava erillisinä osina, sillä BCA mallintaa vain törmäyksiä. Tavallisissa MC-simulaattoreissa kuten TRIMissä ei huomioida historiaa eli jokainen kohteeseen tuleva ioni näkee saman kohteen eikä aikaisempien ionien aiheuttamia vaurioita huomioida. On olemassa myös niin sanottuja dynaamisia simulaattoreita, jotka huomioivat prosessin aikana tapahtuvat kohteen ominaisuuksien muutokset [23].

Suosituin MC-simulaattori lienee TRIM ja seuraavana saattaa tulla MARLOWE johdannaisineen. Molemmat edellä mainituista simulaattoreista ovat ilmaisohjelmia ja löydettävissä internetistä. Kirjallisuustutkimuksen perusteella vaikuttaa siltä, että monet tutkijat ovat muokanneet käyttämiään simulaattoreita painottaakseen tärkeinä pitämiään efektejä. Vain osa simulaattoreista kuten MARLOWE tai Crystal-TRIM kykenee käsittelemään kiteistä materiaalia oikein, sillä ionien kulkua amorfisessa aineessa on helpompi mallintaa MC-simulaatiossa. Joka simulaattorilla on omat painopistealueensa. Jotkut simulaattorit ovat erikoistuneet vain tiettyihin ionilajeihin ja kohteisiin, suurimman osan pyrkiessä yleiskäyttöisyyteen.

SRIM-simulaatio-ohjelma

SRIM-simulaatio-ohjelma laskee kohteeseen syntyvää 3D-ionijakaumaa TRIMillä ja tunkeutumisvyöhytettä SRIMillä olettaen sylinterisymmetrian ja amorfisen kohteen. Ohjelma käyttää ionien ja kohdemateriaalin välisten vuorovaikutusten mallintamiseen ZBL-potentiaalifunktioita. TRIM sisältää vauriomallinnuksen sekä kulma- ja energiajakaumia takaisinsironneille ja kohteeseen päätyneille ioneille. [35]

Simulaatiossa kohdemateriaalin lämpötilan oletetaan olevan 0 K, jolloin diffuusiota ja vaurioiden itsekorjautumista ei tarvitse huomioida lainkaan. Koska ohjelma olettaa amorfisen kohteen 0 K:ssa, ei se kykene mallintamaan kunnolla ioni-istutusta kiteiseen materiaaliin, vaikkakin monessa tapauksessa TRIMin avulla saadaan riittävän

tarkkoja tuloksia. Ongelmia tulee, jos kiteisyyteen liittyvät ilmiöt kuten kanavointi tai kidevirheet ovat merkittäviä.

TRIM-ohjelmassa käsiteltävä alue jaetaan sataan osaan syvyysuunnassa (ikkunointi). Jos halutaan tarkkaa dataa suurelta alueelta, on laskenta toistettava eri alueille. Ohjelma laskee täsmälleen samat kulkuradat ioneille joka kerta, mikäli satunnaislukusyöte pysyy samana. Kun laskenta on suoritettu kaikille alueille, yhdistetään saatu data kattamaan koko alueen. [35]

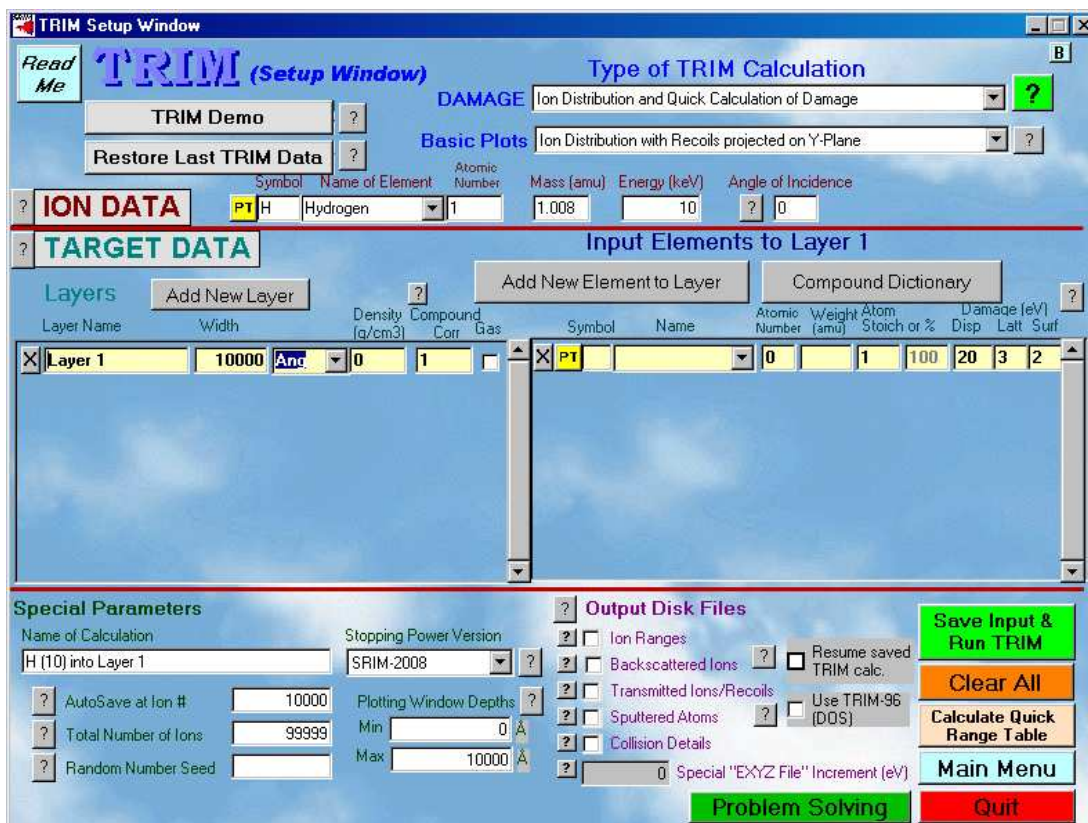
TRIM vaatii syötteenä tiedot kohteesta ja sen pinnalla mahdollisesti olevista kalvoista sekä käytettävästä ionilajista ja energiasta. Mallinnuksen tasoa voidaan muuttaa asetustiedostoista ja graafisesta käyttöliittymästä. Suurin osa datan määrää rajoittavista approksimaatioista voidaan kytkeä pois päältä. Erilaisia valintoja on olemassa kaikkien ionien loppukoordinaattien ja kaikkien törmäysten laskemisesta ja keräämisestä talteen eritasoihin vauriomalleihin. Myös varsinaiseen laskentaan käytettävien ionien kokonaismäärää voidaan muuttaa tiettyyn rajaun saakka. Alueellisessa törmäys/vauriomallinnuksessa käytettävien tapahtumien määrä on oletuksena melko pieni, mutta sitä voi muuttaa TRIMin asetustiedostoista. Ioneille voidaan määrätä energiajakauma ja niiden tulokulmaa sekä aloitusyvytyttä voidaan vaihdella.

Ohjelmasta saa 3D-ionijakauman ja törmäysaineiston lisäksi ionien polut kohteessa, ionijakauman vaakatasossa, tietoa ionien energian menetyksestä elektroneille ja fononeille eli käytännössä kaiken mitä lasketaan. TRIM kykenee laskemaan myös jokaiselle ionille ja atomille täyden kineettisen datan. Ohjelmasta saadaan myös takaisinsironneiden ja läpäisseiden ionien radat ja loppuenergiat. [35]

Tässä työssä käytettiin SRIM-ohjelmapakettia (versio 2008), koska se on hyväksi todettu ja yleisessä käytössä. Myös SRIM-ohjelmapaketin käyttöliittymä (TRIMin käyttöliittymä kuva 17) on laadukas ja vain harvoja asetuksia on muokattava asetustiedostoista. Ohjelmapaketilla on myös hyvät kotisivut, joilta löytyy kattava dokumentaatio ohjelman syötetiedostoista, asetuksista ja tulostustiedostoista. Käytetty laskentamenetelmä puolestaan kuvataan tarkkaan vastaavassa oppikirjassa. SRIM-ohjelmapaketti koostuu useista eri moduuleista, joita voidaan käyttää myös muiden ohjelmien yhteydessä. Simulaation lopputulosten analysointiin on saatavilla valmiina erilaisia työkaluja ja joillakin ohjelmilla kyetään myös generoimaan syötteitä TRIMille.

Tulosten analysointiin käytetään usein Matlabia, mutta tehtävään löytyy myös erilisiä ohjelmapaketteja. SRIMin kotisivuilta löytyy suoraan linkki SRIM Supporting Software Module (SSSM) nimisen ohjelman kotisivuille. Tämä ohjelma kykenee tulostusanalyysien lisäksi tarjoamaan SRIMille syöttötietoja. SSSM käyttää SRIMin tuottamaa tiedostoa TRANSMIT.TXT ja laskee sen perusteella erilaisia jakaumia kohteen läpimenneille ioneille. Saatuja tuloksia voidaan käyttää syöttötietoina SRIMille, ja ohjelma kykenee myös generoimaan todellisuutta vastaavan ionisuihkun profiilin käytettäväksi TRIMissä yhteen pisteeseen osuvien vakioenergisten ionien sijaan parantaen simulaation realistisuutta. [19, 20]

Kuvaan 18 on merkitty käytetty koordinaatisto sekä määritelty laskettavan jakauman tunnusluvut. TRIMin tuottamista tiedostoista tärkeimpiä on ionien loppukoor-

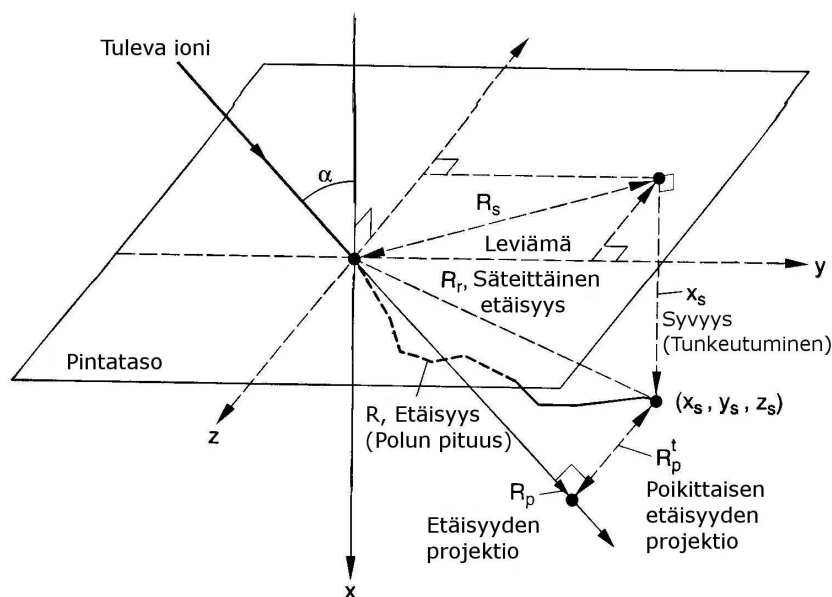


Kuva 17: Kuvakaappaus TRIM:n käyttöliittymästä.

dinaatit sisältävä RANGES_3D.TXT. Kiinnostavimpia tuloksia ovat erilaiset xy- ja xz-tasolle projisoituja ionijakaumia kuvaavat tilastolliset tunnusluvut. Ioni-istutusta puolijohteisiin malinnetaan yleensä approksimoimalla ionijakaumaa useita parametrejä sisältävällä kaavalla, jonka tulee tuottaa huippu. Aluksi käytettiin puhtaasti Gaussisia malleja, mutta ne havaittiin nopeasti riittämättömiksi ja seuraavaksi kokeiltiin kaksoishuippuisia Gaussisia malleja. Sittemmin on siirrytty yleisimpiin ja enemmän parametrejä sisältäviin lausekkeisiin, kuten Paerson- tai Lorenz-jakaumiin. Tarkoituksena on päästä riittävään hyvään yhteensopivuuteen kokeellisen aineiston kanssa. [1]

3.2 Pinta- ja 3D-kuvioiden tutkiminen

Mikro- ja nanosysteemien tutkimiseen käytettävä menetelmä valitaan kohteen ominaisuuksien ja sen perusteella mitä kohteesta halutaan mitata. Optisella mikroskoopilla voidaan etsiä kohteesta pienimmillään mikrometrin suuruusluokkaa olevia rakenteita, mutta näkyvän valon aallonpituus ja diffraktio rajoittavat pienimmät erottuvat yksityiskohdat noin kahteensataan nanometriin (Abben raja). On olemassa optisia mikroskooppeja, joilla päästään edellä mainittua rajaa parempaan resoluutioon, mutta niiden käyttö on vähäistä. Matalan resoluution vuoksi optiselle mikroskoopille ei ole juurikaan käyttöä nanorakenteiden tutkimisessa, mutta liitettäessä



Kuva 18: Ionijakauman parametrien ja koordinaatiston määrittely. [21]

nanorakenteita makromailmaan, optinen mikroskoopi on erittäin hyödyllinen.

Käyttämällä optista lähikenttämikroskooppia (NSOM) voidaan päästä jopa muutamman kymmenen nanometrin resoluutioon. NSOMissa käytettävä optinen koetin on lasia tai optista kuitua, joka on päällystetty aivan kärkeä (apertuuri) lukuunottamatta metallilla. Resoluutio määräytyy käytännössä apertuurin koosta, joka voi olla muutamasta sadasta nanometristä aina viiteenkymmeneen nanometriin asti. NSOMissa kärki on pidettävä noin 10-50 nm:n päässä eli apertuurin kokoa ja rajoittavaa resoluutiota pienemmällä etäisyydellä näytteen pinnasta. [6]

Pyyhkäisyelektronimikroskopia (SEM) on tärkein mikroskopiamenetelmä mikro- ja nanoteknologiassa yltäen jopa alle yhden nanometrin resoluutioon. SEMissä näytettä pommitetaan elektroneilla ja käytettävästä ilmaisimesta riippuen mitataan joko takaisinsironneita tai näytteestä irronneita ns. sekundäärisiä elektroneja. Elektronisuihku ei vaurioita näytettä, vaikka se voikin varautua ellei sähköinen kontakti kuvattavan kerroksen ja alustan välillä ole kunnossa tai näyte ole eriste. SEM sopii hyvin pinnan tutkimiseen, mutta syvien ja pienten rakenteiden tutkiminen ei onnistu kunnolla. Jos käytössä on kaksoissäteinen FIB/SEM-laite, voidaan ionisuihkun kohteeseen aiheuttamia muutoksia helposti tutkia ionisuihkukäsittelyjen välillä.

3D-kuvioiden sivuprofiileja tutkittaessa näytteen ja elektronisuihkun välisen kulman on oltava alle 90 astetta, jotta elektronit osuisivat myös kohteen sivuille. Korkealaatuisten 3D-kuvien saamiseksi kohdetta on kuvattava useasta eri suunnasta. Tutkittavien kohteiden koko voi vaihdella jopa sadoista mikrometreistä muutamaa nanometriin. FIBin yhteydessä olevalla mikroskoopilla ei yleensä päästä samaan resoluutioon kuin pelkän elektronisuihkun sisältävillä laitteistoilla. Tässä työssä käytettiin yksinomaan SEMiä, jolla mitattiin tehtyjen rakenteiden kokoa ja viivojen välisiä etäisyyksiä sekä tehtiin yleisluonteista pinnan tarkastelua.

Ionisuihkumikroskoopin ominaisuudet ja suorituskkyky ovat pitkälti samalla tasolla SEMin kanssa, mutta sen resoluutio on noin kymmenen kertaa huonompi kuin SEMin ($SEM < 1\text{ nm}$ ja ionimikroskooppi $\sim 7\text{ nm}$). Ionisuihkumikroskoopin käyttö myös kontaminoi näytettä käytetyillä ioneilla ja voi vaurioittaa tutkittavaa kohdetta. Edellä mainittujen seikkojen takia ionimikroskooppia ei yleensä käytetä nanorakenteiden tutkimisessa. Toisaalta ionimikroskooppia voidaan käyttää näytteen pinnan alla olevien kerrosten tutkimiseen ionisuihkun irrottaessa materiaalia paljastuvalta alueelta kuvauksen edetessä.



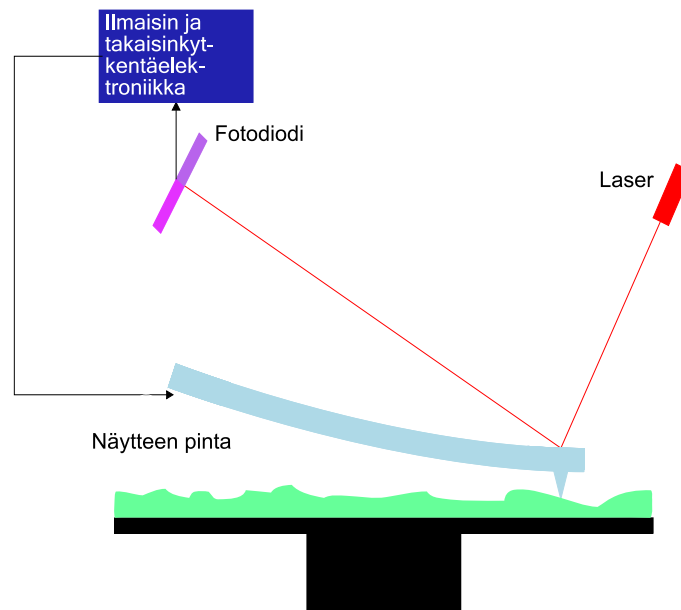
Kuva 19: Kaavio AFMin kärjen muodon ja saatavan kuvan suhteesta.

AFMissa eli atomivoimamikroskoopissa näytteen pintaa tutkitaan värähtelijään kiinnitetyllä erittäin terävällä neulalla, jonka kärki voi olla kooltaan vain joitain nanometrejä. AFMilla kyetään havaitsemaan näytteen pinnassa jopa nanometrin osien korkeusvaihtelut, vaakaresoluutio on nanometrin luokkaa ja riippuu neulan koosta. AFM-mittauksessa saatavan profiilin määrää ”tip convolution”, joka tarkoittaa sitä, että jokainen kuvan datapisteistä edustaa spatiaalista konvoluutiota kärjen muodon ja kuvattavan kohteen muodon välillä. Niin kauan kuin kärki on paljon terävämpi kuin kohde, saadaan todellinen profiili, mutta jos kohde on kärkeä terävämpi, kärjen muoto määrittelee kuvan. Kuva 19 havainnollistaa edellä kuvattua tilannetta.

AFMin kärkeen kohdistuvat van der Waals voimat, joiden voimakkuus ja vaikutussuunta riippuu kärjen etäisyydestä näytteen pinnasta. Lähietäisyydellä van der Waals-voimia vastaava potentiaali on muotoa B/r^{12} , jolloin vuorovaikutustyyppi on karkottava (repulsiivinen). Pidemmällä etäisyyksillä potentiaali muotoa $-A/r^6$ ja vuorovaikutustyyppi on puoleensavetävä (attraktiivinen). AFM:lle voidaan määritellä kolme periaatteellista toimintatilaa: kontakti, kosketus ja ei-kontakti. Kontaktimoodissa kärki osuu näytteen pintaan ja kokee karkottavan voiman, joka pakottaa kärjen seuraamaan pintaprofiilia tasaisesti. Resoluutio on parempi kuin muissa toimintatiloissa, koska poikkeama ja poikkeuttava voima ovat suurempia. Kosketusmoodi on kontakti- ja ei-kontaktimoodien välimuoto, jossa kärki osuu kevyesti näytteen pintaan. Värähtelyn amplitudi vaihtelee tällöin pinnan topografian mukaan pyyhkäisyn edetessä, missä tapauksessa edelleen ollaan karkottavan vuorovaikutuksen alueella mutta lähempänä potentiaaliminimiä kuin kontaktimoodissa. [6]

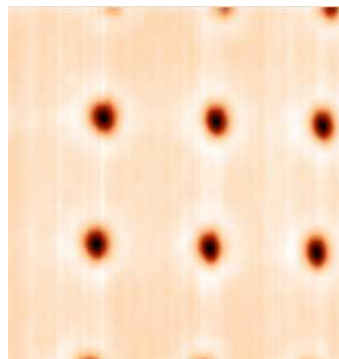
Kontaktimoodiin verrattuna kosketusmoodin etuna on se, ettei näytteen pinta vaurioidu ja lisäksi saavutetaan lähes yhtä hyvä resoluutio. Ei-kontaktimoodissa kärki pidetään vähintään useiden nanometriä päässä näytteen pinnasta, jolloin näytteen vahingoittumisesta ei ole pelkoa, mutta resoluutio kärsii selvästi. Kontaktimoodissa voidaan päästä jopa atomitasen resoluutioon. Toimintatilasta riippumatta haluttu mitta saadaan värähtelijän poikkeamasta vaakatasosta. AFMin mittausjärjestely on esitetty kuvassa 20. [6]

Suurin mitattavissa oleva korkeusero riippuu värähtelijän maksimipoikkeamasta ja



Kuva 20: Kaaviokuva AFMin mittausjärjestelystä.

on yleensä $10\text{ }\mu\text{m}$ luokkaa. AFMin neula voi helposti katketa pienissä jyrkkäreunaisissa rakenteissa, ja toisaalta neula saattaa myös tuhota hienorakenteita.



Kuva 21: AFM-kuva substraattiin ionisuihkulla tehdyistä aukoista.

Kuva 21 on AFM-kuva rei'istä, josta havaitaan kuinka selvästi reiät erottuvat taustasta. Samasta kuvasta nähdään kuinka neulan rajoittunut liikerata ja koko estävät reiän yksityiskohtien erottumisen. AFMista saatava aineisto on yleensä kolmiulotteista, mihin ei muilla mikroskopiamenetelmillä pystytä.

4 Valmistustekniikka

Tässä kappaleessa kuvataan käytetyt laitteistot ja koejärjestelyt. Koejärjestelyt-osiossa kerrotaan valmistetuista rakenteista ja niiden käyttötarkoituksista sekä tarkat prosessikuvaukset.

4.1 Laitteistokuvaukset

Tämän työn kannalta tärkein laitteisto on kaksoissäteinen FIB/SEM, jolla tehdään prosessin tärkein osuus eli lopullisen kuvion määräävä ioni-istutus. ICP-RIEllä tehtävä etsaus ei ole herkkä lopputulokseen vaikuttaviin virheisiin verrattuna ioni-istutukseen, vaikka ongelmat etsausprosessin aikana voivatkin pilata lopputuloksen.

4.1.1 Kaksoissäde FIB/SEM

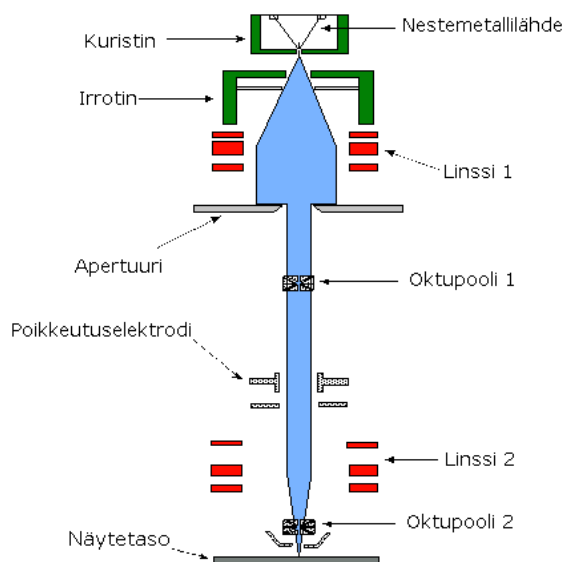
Kaksoissäde FIB/SEM on nanoteknologiassa monikäyttöinen työkalu, joka koostuu samassa laitteessa olevista elektroni- ja ionitykeistä. Laitteisto on nykyisin aina tietokoneohjattu, joten järjestelmän suorituskyky riippuu osittain käytettävästä ohjelmistosta. Laitteisto mahdollistaa molempien tykkien virtojen ja kiihdytysjännitteiden säätämisen.

FIBiä voidaan käyttää useisiin eri tehtäviin aina resistin valotuksesta ioni-istutukseen ja materiaalin poistoon sekä mikroskopiaan. Ioni-istutuksessa annosta voidaan periaatteessa säätää jopa yhden ionin tarkkuudella. Se miltä kohde näyttää FIB-käsittelyn jälkeen, riippuu annoksesta ja jossain määrin myös käytetystä virrasta. Näyte asetetaan tyhjiökammioon, jonka paine on suuruusluokkaa $100 \mu\text{Pa}$ eli 10^{-6} mbar.

Kohteeseen voidaan myös syöttää kammiossa olevan neulaventtiilin kautta erilaisia prosessikaasuja, joita voidaan käyttää etsauksen nopeuttamiseen tai ohutkalvon kasvattamiseen. Etsauksessa käytettävät kaasut syövyttävät koko näytettä eivätkä vain haluttuja kuvioita, mikä heikentää saatavien kuvioiden laatua. Erityisen selvästi prosessikaasujen vaikutus näkyy kuvioiden reuna-alueilla, sillä ne jäävät epämääräiseksi. Valmistajat pitävät yleensä prosessikaasujen tarkan koostumuksen salaisuutena.

Keskitetyn ionisuihkun lähteenä käytetään yleensä LMISiä (Liquid-metal ion source; nestemetalli-ionilähde), josta sähkökenttä pakottaa ionit poistumaan neulaventtiiliä pitkin. Irrotetut ionit kulkevat neulan terävän kärjen läpi matkallaan lähteestä ionioptiikkapylvääseen (kuva 22), jossa ionijakauma keskitetään sähkökentillä käytetystä virrasta riippuen halkaisijaltaan jopa alle 10 nm olevaksi ionisuihkuksi. Ioniop- tiikkaosassa ovat myös säteenpoikkeutus- ja sigmatismisäädön elektrodit. [32]

Jossain laitteissa ionioptiikkaosaan kuuluu myös massaerotin, joka päästää läpi vain ne hiukkaset, joilla on tietty varaus-massasuhde. Massaerotinta tarvitaan lähinnä vain nestemäisiä metalliseoksia ionilähteinä käyttävissä korkeaenergialaitteissa. Io-



Kuva 22: Yksinkertaistettu kaavio ionitykistä. [5]

nisuihkun profiilin muoto määräytyy jo ionilähteessä, mutta myös ionioptiikka muuttaa profiilia jossain määrin. Käytettävistä ionilajeista suosituin on Ga, mutta melkein kaikkia metalleja (esim. As, Bi, Ni ja Pt) ja metalliseoksia (esim. PdAs ja AuSi), joilla on suhteellisen matala sulamispiste ja reaktiivisuus voidaan käyttää. [32]

Laitteessa olevan elektronitykin pääasiallinen käyttö on SEM, mutta sitä voidaan myös käyttää elektronisuihkulitografiaan (EBL), jos käytettävä ohjelmisto tukee kyseistä toimintoa ja tykissä on EBL-valmius. SEMiä käytetään lähinnä pinnan tutkimiseen ennen ja jälkeen FIB-käsittelyn sekä mahdollisten FIB-käsittelyn jälkeisten etsausprosessien tulosten tarkasteluun. Laitteen elektronimikroskooppia käytetään myös ionisuihkun fokusointiprosessissa.

Tässä työssä käytetty Helios NanoLab 600 kaksoissäde FIB/SEMin (FEI Company) avulla voidaan käsitellä näytteitä aina pienistä alle neliösentin paloista aina jopa 150 mm kiekkoihin asti, kunhan valitaan oikea näytteenpidin kullekin näytekoolle. Kuvassa 23 olevasta Helioksen valokuvasta voidaan erottaa laitteen sivulla oleva ionitykki ja osa prosessikaasujen syöttöjärjestelmää sekä pystysuorassa oleva elektronitykki. Käytetyssä järjestelmässä ionitykki on 52 asteen kulmassa elektronitykkiin nähden, joten ionisuihkun käyttämiseksi on näytetasoa kallistettava 52 astetta ja siirrettävä pystysuunnassa noin neljän millimetrin kohtisuoralle etäisyydelle elektronitykin kärjestä. Kuva 24 on kuva kammion sisäosista ja esittää edellä kuvattua tilannetta. Tällöin ionit osuvat näytteen pintaan suorassa kulmassa. Suurin mahdollinen käsittelyalue pelkästään ionisuihkua poikkeuttamalla on noin $700\text{ }\mu\text{m} \times 700\text{ }\mu\text{m}$. [7]



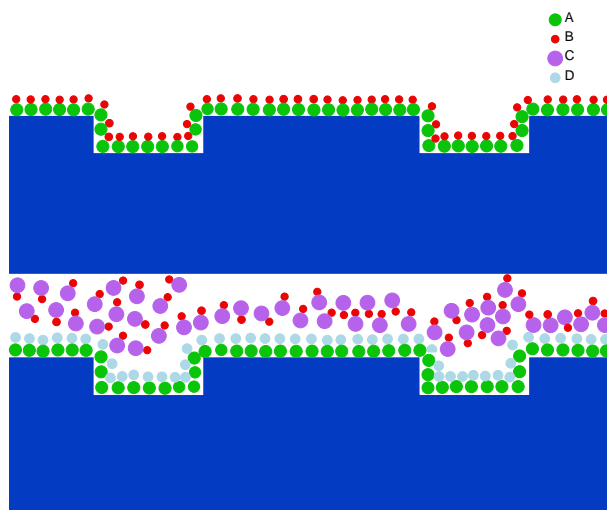
Kuva 23: Helios NanoLab 600 kaksoissäde FIB/SEM. [7]



Kuva 24: Helioksen prosessikammion sisäosat.

4.1.2 ALD

ALD:ssä (atomic layer deposition) eli atomikerroskasvatuksessa reagoivat kaasut syötetään reaktoriin pulsseittain, jolloin substraatin pintaan kasvaa vajaa 1 atomikerros reagenssipulssia kohden. Ensin reaktoriin syötetään yhdistettä AB, joka reagoi substraatin pinnassa sitoutuen siihen. Tämän jälkeen reaktoriin syötetään yhdistettä CD, joka reagoi AB:n kanssa jättäen kerroksen ainetta AD substraatin pintaan.



Kuva 25: Kaavio ALD-prosessista. Ensimmäisessä vaiheessa yhdiste AB kiinnittyy substraatin pintaan (ylempi kuva), seuraavassa vaiheessa reaktoriin syötetty yhdiste CD reagoi AB:n kanssa. Lopussa substraatti on päällystetty kerroksella yhdistettä AD ja reaktiotuote BC poistuu reaktorista (alempi kuva).

Kuvassa 25 havainnollistetaan edellä kuvattua prosessia. Prosessi tapahtuu yleensä alhaisessa paineessa ja edellisen pulssin kaasu poistetaan reaktorista ennen seuraavaa pulssia. Tätä prosessia toistetaan, kunnes kasvatettu kerros on halutun paksuinen. ALD on ääritapaus pintareaktiorajoitteisesta prosessista. Usein havaitaan, ettei yhdestä reagenssipulssista kasva täyttää atomikerrosta. Kasvunopeudet ovat muutamia nanometrejä minuutissa eli huomattavasti hitaammin verrattuna korkeamman lämpötilan LPCVD-nitridiin tai monikiteiseen piihin. [29]

Taulukko 2: Käytetyn ALD-reaktorin tärkeimmät ominaisuudet. [2]

Prosessikammion koko	500 mm×500 mm
Yleisimmät ohutkalvolajit	Al_2O_3 , La_2O_3 , Ta_2O_3 , ZnO , TiO_2 , TiN , AlN , TaN
Kammion paine	<25 mbar (voi olla jopa 1000 mbar)
Kasvatustemperatuurila	max 500°C

Jos kemikaaleja vaihdetaan pulssien välillä, saadaan nanolaminaatteja. Johtuen ALD:n pintareaktioluonteesta se kykenee peittämään koko pinnan erittäin tasaisella kerroksella ilman paksuusvaihteluja myös suuren korkeus-levyysuhteen rakenteissa. Myös rakeisten pintojen päällystäminen onnistuu ongelmitta. Tyypilliset kalvon paksuudet ovat 1-500 nm. ALD:n yleisin käyttökohde on puolijohdeteollisuudessa eriste- ja diffuusionestokalvojen teko. Intel kasvattaa prosessoriansa oksideja ALD:llä. ALD:tä käytetään myös elektroluminesenssinäyttöjen valmistuksessa sekä suuren suhteellisen permittiivisyyden eristekalvojen teossa. Tässä työssä käytetyllä Beneq TFS 500 ALD -laitteella (kuva 26), jonka tärkeimmät ominaisuudet on annettu taulukossa 2, voidaan kasvattaa erilaisia oksidi- ja nitridiohutkalvoja [2].



Kuva 26: Beneq TFS 500 ALD-reaktori. [3]

4.1.3 ICP-RIE

ICP-RIE-reaktori rakentuu kahdesta tehonlähteestä (ICP+CCP), joilla säädetään reaktorissa olevan plasman ominaisuuksia sekä ionipommituksen voimakkuutta. Prosessikammio pidetään koko ajan tyhjiössä ja kiekot laitetaan sisään latausluukun ('load lock') kautta. Prosessikaasut syötetään reaktiokammioon sen katosta ja reaktiotuotteet poistetaan alakautta.

ICP-RIE-reaktoreissa on käytettävissä useita eri etsauskaasuja, joista valitaan sopiva yhdistelmä prosessoitavan materiaalin perusteella. ICP:n teho on tyypillisesti välillä 500–2000 W ja CCP:n 0–300 W. Reaktorissa oleva plasma muodostetaan käyttämällä voimakasta RF-kenttää, jonka taajuus on yleensä 13,56 MHz prosessikaasujen ionisoimiseen. Prosessikammion paine on tyypillisesti välillä 100–1000 Pa ja kaasuvirtaus voi nousta enimmillään arvoon 10 sccm (stantardikuutiosenttimetriä minuutissa). Kiekon takapintaa vasten olevan elektrodin lämpötila voi puolestaan olla mitä tahansa 120 K:n ja 670 K:n väliltä. Jäähdytyksessä kiekon takapintaan kohdistuva paine vaikuttaa myös saatavaan etsausprofiliin. Sallitut kiekkokoot ja paksuudet vaihtelevat laitteittain, mutta kiekkoa paikallaan elektrodia vasten pitävän mekanismin puristusvoimaa voi useimmiten säätää.

Etsausprosessin yksityiskohdat riippuvat osittain reaktorin rakenteesta ja valmistusmateriaaleista. Tyypillisiä prosesseja ovat piin nopea etsaus kryogeenisellä DRIE-prosessilla sekä III-V-yhdistepuoliyohteiden etsaus klooripohjaisilla kaasuilla. Tässä



Kuva 27: Plasmalab System 100 - ICP 180 -järjestelmä. [13]

Taulukko 3: Käytetyn ICP-RIE:n tärkeimmät ominaisuudet. [2, 31]

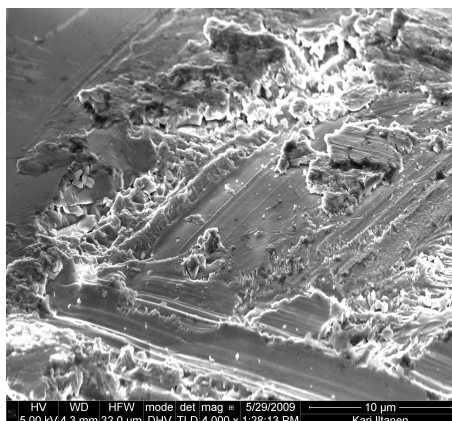
Kiekkokokoko	100 mm
Prosessikaasut	SF ₆ , SiCl ₄ , BCl ₃ , Cl ₂ , N ₂ , O ₂ , H ₂ , Ar
Käyttöpaine	133 mPa–33.3 Pa (1–250 mTorr)
Elektrodin RF-teho (CCP:n teho)	0–300 W
ICP:n RF-teho	0–2000 W
Elektrodin lämpötila-alue	–150°C–400°C
Tyypillisiä etsausnopeuksia	Si: 4 μm/min, InP ja GaAs: 2 μm/min, GaN: 600 nm/min

työssä käytettiin Plasmalab System 100 - ICP 180 -järjestelmää (Oxford Instruments) (kuva 27), jonka tärkeimmät spesifikaatiot löytyvät taulukosta 3.

4.2 Koejärjestelyt

Tässä osiossa kerrotaan miten kokeet tehtiin ja millaisia vaikeuksia voidaan odottaa kokeiden aikana. Käytettävä näyte on puhtaasta piikiekosta irrotettu noin yhden neliösenttimetrin kokoinen pala, mikä on päällystetty ALD:llä kasvatetulla alumiinioksidihutkalvolla säteen muodon määrittämisessä käytettävien reikien kokoa mitattaessa. Näytepala ladataan kaksisäde FIB/SEMin sisään, jonka tullessa käyttövalmiiksi suoritetaan fokusointiprosessi, jonka tarkoituksena on kohdistaa elektroni- ja ionisuihkuja mahdollisimman paljon. Fokusointiprosessin jälkeen päästään tekemään ioni-istutusta. Ioni-istutuksen jälkeen tehdään vielä ICP-RIE-etsaus. Lopuksi etsattuja näytepaloja tutkitaan SEMillä.

4.2.1 Fokusoointiprosessi



Kuva 28: SEM-kuva fokusoointia varten näytteessä olevasta naarmusta.

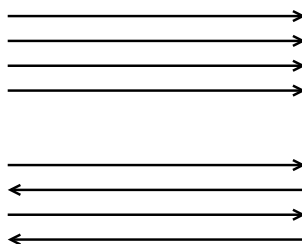
Laitteiston kohdistaminen aloitetaan SEMistä säätämällä stigmatismia ja terävöintiä kunnes kuvanlaatu ei enää parane. Säätämisen aikana mikroskooppi kuvaa näytteen pinnalla olevia hiukkasia ja/tai naarmuja. Kun SEMin kuva on kohdallaan, kohdistetaan ionisuihkumikroskooppi samalla tavalla kuin SEM. Ionisuihkon kohdistuksen hyvyttä arvioidaan poraamalla näytteen pintaan reikä, josta otetaan SEM-kuva. Jos saadussa SEM-kuvassa näkyvä reikä on pyöreä todetaan ionisuihkon säätöjen olevan kohdallaan. Isoilla virroilla kohdistusta ei ole tarkoituksaan saada kovin hyväksi, ja pienillä virroilla puolestaan matalasta signaali-kohinasuhteesta johtuva heikko kuvanlaatu haittaa säätämistä. Kuvassa 28 on näytteen pinnassa oleva naarmu, jota käytetään kummankin mikroskoopin fokusoinnissa.

Tunnetun kohteen käytölle ionisuihkon kohdistukseen on etuja ja haittoja. Käytännössä haitat ovat niin paljon hyötyjä suurempia, ettei menetelmä ole käyttökelpoinen. Menetelmän etuna on kohdistuksen saaminen kohdalleen, sillä tulkinanvaraa ei jää. Tärkeimmät ongelmat ovat tunnetun kohteen aikaansaaminen/löytäminen ja saaminen näytteen pinnalle, jossa se tuhoutuu fokusoinnin aikana. Tunnettu kohde on siis käytännössä kertakäyttöinen ja siksi kyseessä on melko merkityksellinen menetelmä.

4.2.2 FIB ioni-istutus

Pintakuvioiden määrittämiseen tarvitaan aiemmin määritettyä ionisäteiden profiilia. Myös pyyhkäisymenetelmällä on oma merkityksensä. Rasteripyyhkäisyssä säde liikkuu aina samaan suuntaan, kun taas serpentiinipyyhkäisyssä liikesuunta muuttuu rivin päässä. Kuva 29 havainnollistaa edellä kuvattujen pyyhkäisymenetelmien toimintaa. Kohdemateriaalissa tapahtuu istutuksen aikana myös ei-toivottuja muutoksia. Pintakerroksilla on jonkin verran merkitystä lopullisen ionijakauman kannalta.

Lopullisena tavoitteena on kyetä ennustamaan FIB+ICP-RIE-prosessin lopputulos säteen profiilista, valotuspisteistä, valotusajoista ja ICP-RIE:n annos-etsausaikakäy-



Kuva 29: Ionisuihkun liikesuunnat eri pyyhkäisymenetelmissä. Ylempi kuvaa rasteripyyhkäisyä ja alempi serpentiinipyyhkäisyä.

rästä. Ennusteena saatua kuviota verrataan SEM-kuvaan kyseisestä rakenteesta. Näiden pitäisi olla yhtenevät virhemarginaalin sisällä. Kanavoinnin merkityksen arvioimiseksi on ionisuihkun asemaa kohteen kidesuuntiin nähden yritettävä seurata ioni-istutuksen aikana. Käytettävän virran eli annosnopeuden vaikutusta saatavaan lopputulokseen on syytä tutkia, vaikka sen vaikutukset johtunevat säteen huonommista keskitysmahdollisuuksista suurimmilla virroilla. Ionisuihkun reuna-alueiden vaikutusta täytyy myös arvioida lopputuloksen kannalta.

Jotta FIBillä voidaan suorittaa ioni-istutusta tasalaatuisesti, on fokusointiprosessin ja laatukriteerien oltava kunnossa. Prosessin optimoimiseksi ja haittojen minimoimiseksi on tehtävä annosmääräkokeita. Perusannos valittiin olemassaolevien tulosten perusteella määritetyn kriittisen annoksen kaksinkertaiseksi annokseksi. Valotusajajat eri virta/suurennusyhdistelmille lasketaan yhdistelmän 1.5 pA 10000x:n (virta 1.5 pA ja suurennus 10000x) valotusajasta, joka saadaan perusannoksesta olettamalla käsittelyalueen pinta-alaksi valotuspisteen ala. Annos-etsausaika käyrältä on määritettävä kriittinen ioniannos maskiefektille.

4.2.3 ICP-RIE-etsaus

Koska käytettävät näytepalat ovat vain noin 1 cm²:n kokoisia, on ne kiinnitettävä johonkin alustaan ICP-RIE-prosessia varten. Kiinnitysalustana käytetään yleensä piikiekkoa. Näytepalat kiinnitetään kiekolle 'liimalla', jolta vaaditaan hyvän lämmönjohtavuuden lisäksi se, että se säilyttää vaadittavat ominaisuudet kryogeenisissäkin lämpötiloissa. Käytettävän 'liiman' tulee kiinnittyä helposti ja nopeasti sekä kestää prosessikammion olosuhteet. Se ei saa sisältää mitään epäpuhtauksia, joilla olisi vaikutuksia materiaalin ominaisuuksiin ja/tai prosessiin. Näytteen irrottamisen alustastaan tulee onnistua helposti aiheuttamatta alustalle tai näytteelle vaurioita. Usein 'liimana' käytetään fotoresistiä, joka kovetetaan lämpölevyllä. Koska alustana käytettävä kiekko kuluu prosessissa, on se vaihdettava tietyssä vaiheessa, jotta vältetään sen hajoaminen prosessikammiossa.

Taulukossa 4 esitetään tärkeimmät prosessiparametrit, jotka olivat samoja kaikille rakenteille. Kun seostusprofiili ja sitä myötä haluttu etsaussyvyys tunnetaan, voidaan 'puhtaan' materiaalin etsausnopeuden perusteella määrittää etsausaika. Etsausaikaa saatetaan joutua säätämään prosessin lopputuloksen perusteella ja joskus

Taulukko 4: Käytetyt etsausparametrit.

Lämpötila	-120°C
Kammion paine	9 mTorr
SF6-virtaus	40 sccm
O2-virtaus	6.5 sccm
ICP-teho	1000 W
CCP-teho	3 W
Etsausaika	30 s

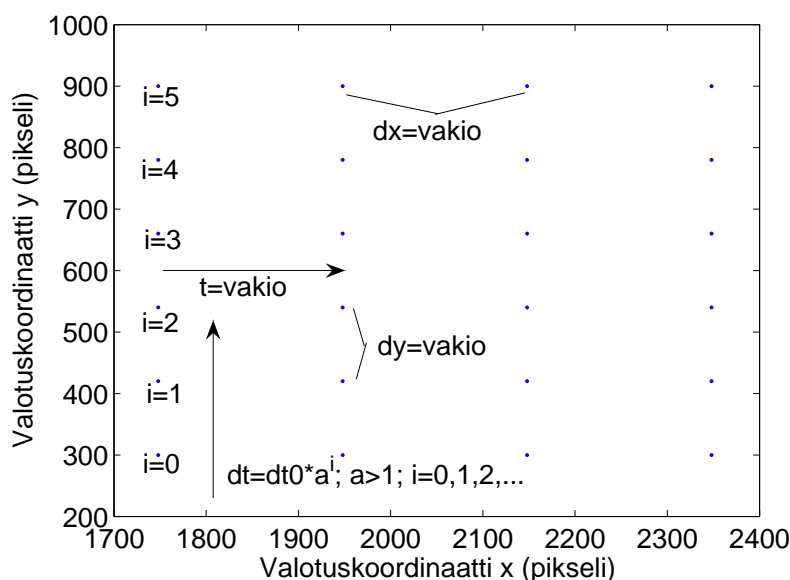
järjestelmän suorituskyvyn heikkenemisen vuoksi. Kun halutut kuviot on etsattu, niitä tutkitaan SEMillä haluttujen mittaustulosten saamiseksi.

5 Mittaustulokset ja niiden anylysointi

5.1 Mittaukset

Kuvioiden koon mittaaminen SEM-kuvista voidaan tehdä mikroskoopin ohjelmiston mittatoiminnoilla, mutta se on liian hidasta, joten tehtävään kehitettiin Matlab-koodi. Mittausta tehdessä kuvion rajat on arvioitava kuvasta silmämääräisesti. Reuna-alue on aina hiukan epämääräinen, joten ensin mitataan kuvion todennäköisin koko arvioimalla, missä reuna on. Seuraavaksi määritetään kuvion pienin ja suurin mahdollinen koko virhearvion saamiseksi. Kyseiset arvot otetaan epämääräisen alueen reunoilta.

5.1.1 Säteen muoto



Kuva 30: Säteen muodon mittaukseen käytetty valotuskuvio.

Säteen muoto kyetään laskemaan kullekin virrälle käyttämällä kohteen pintaan porattuja reikiä. Menetelmässä pidetään virta vakiona ja tehdään reikiä siten, että valotusaikaa kasvatetaan eksponentiaalisesti. Kuva 30 esittää osaa edellä kuvatusta valotuskuviosta. Reikien koosta ja valotusajasta saadaan laskettua säteelle muotofunktio, joka normitetaan. Kaikki asetukset ovat kohdallaan, jos normitetusta muotofunktiosta määritetty puoliarvoveveys vastaa valmistajan ilmoittamaa arvoa noin 5–10 prosentin tarkkuudella.

Yhtälö

$$f = Ae^{-\lambda x} \quad (19)$$

esittää eksponentiaalista muotofunktiota, jonka parametrien estimaatit määritetään pienimmän neliösumman menetelmällä. Ensin lasketaan funktion parametreille es-

timaatit käyttäen annosmäärien suhteita ja reikien sädettä. Koska kaikki muotofunktiot piirretään samaan kuvaan on normitustekijän, jolla funktioista lasketut y:n arvot jaetaan, oltava sama kaikille funktioille. Jos käytettäisiin virtakohtaista normitustekijää, funktiot erottuisivat toisistaan vain yhdellä parametrillä ja ekstrapoloituisivat pisteeseen (0,1), joten saatava kuva olisi epäselvä, koska käyrät menisivät osittain päällekkäin.

Normitustekijänä käytetään suurinta muotofunktioiden vakiokertoimen (parametri A) estimaatista. Näin saatu normitettu muotofunktio piirretään samaan kuvaan normitustekijällä skaalatun y-akselin ja alkuperäisen x-akselin aineiston pisteiden kanssa. Käyrän sovituksen tiettyyn aineistoon pienimmän neliösumman menetelmällä tekevän funktion koodi sekä sovituksen ja alkuperäiset pisteet samaan kuvaan piirtävät komennot löytyvät Matlabin dokumentaatiosta [30].

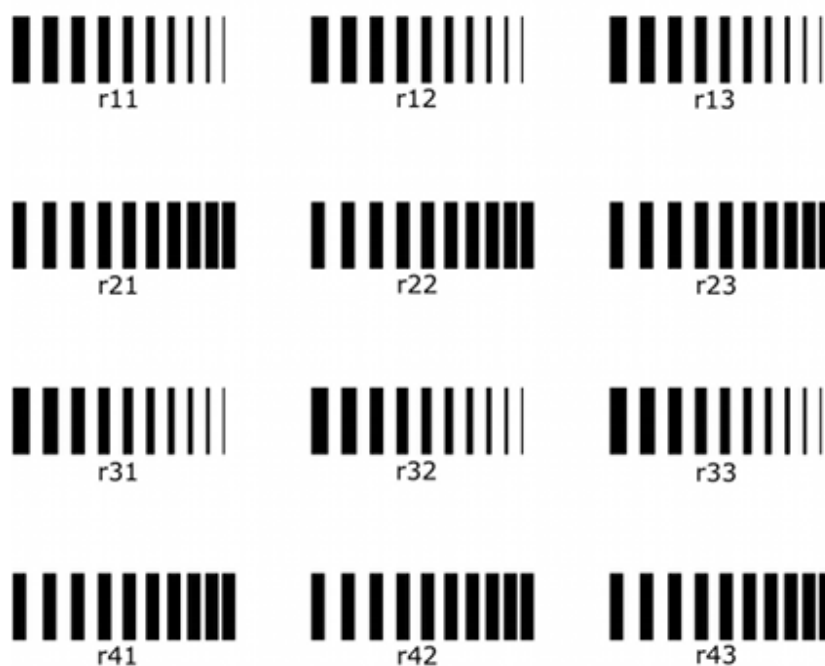
Yhdellä virran arvolla aikaansaadut reiät tehdään samalla kertaa. Reikiä tehtiin neljä rinnakkain ja kustakin rivistä otetussa SEM-kuvassa parhaiten erottuva reikä mitattiin. Reikien koon mittaamisen helpottamiseksi pii päällystettiin ohuella (4 nm) alumiinioksidikalvolla, joka parantaa reikien erottumista SEM-kuvissa. Aikapisteiden eli reikärivien lukumäärä on valittava sen perusteella, kuinka tarkasti säteen profiili halutaan mitata ja montako reikää kirjoitusalueelle mahtuu, jos reikäriveille määritellään tietty minimietäisyys. Suurenus ja kirjoitusalueen koko ja valotuspisteet on valittava siten, että reiät erottuisivat selvästi toisistaan. Virtojen kasvaessa valotusaikoja on pienennettävä, jotta annos pinta-alayksikköä kohden pysyy samana.

Reikien koon mittausvirhettä on yritettävä arvioida SEM-kuvista mittaamalla ylä- ja alarajat reikien koolle, jotta päästään virherajoihin säteen muodolle. Mittausvirhe ja SEMin resoluutio ovat pienillä rei'illä samaa suuruusluokkaa, mutta reikien koon kasvaessa mittausvirhe tulee vallitsevaksi virhelähteeksi. Samalla virralla tehtyjä reikiä mitattaessa on muistettava pitää SEMin säädöt samoina tai saadut mittaustulokset eivät ole enää vertailukelpoisia aiempiin tuloksiin. Menetelmää voi yrittää parantaa materiaalivalinnoilla reikien erottuvuuden lisäämiseksi. Näyte voidaan asettaa minuutiksi 130 asteiselle lämpölevylle kohteeseen jääneen kosteuden poistamiseksi. Tämän toimenpiteen merkitystä lopputulokseen on vaikea arvioida.

5.1.2 Resoluutiotestit

Taulukko 5: Käytetyt annokset ja annoskertoimet eri ruuduille.

Ruudut	Annos cm^{-2}	Annoskerroin
r11 ja r21	1.5×10^{17}	2
r12 ja r21	7.4×10^{16}	1
r13 ja r23	5.6×10^{16}	0.75
r31 ja r41	3.7×10^{16}	0.5
r32 ja r42	1.9×10^{16}	0.25
r33 ja r43	9.4×10^{15}	0.125

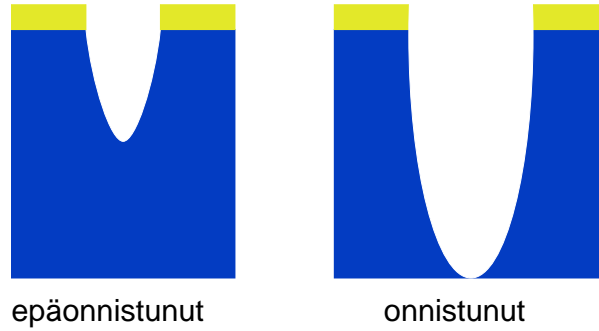


Kuva 31: Viivanleveysmittauksessa käytetty valotuskuvio.

Tarkoitus on määrittää kokonaisprosessin paras mahdollinen resoluutio. Ideoita haettiin kameroiden resoluutiomittauksiin käytettävistä ISO 12233-stantardin mukaisista testikartoista. Kuva 31 esittää käytettyä valotuskuviota, jossa jokaisella kahdestatoista ruudusta on tietty annos, ja siihen on myös merkitty ruutujen nimeämis-käytäntö. Ruutujen annokset valittiin käyttämällä valotusajalle ruutukohtaisia kertoimia, molemmat löytyvät taulukosta 5. Jokainen ruutu koostuu kymmenestä erilisestä suorakaiteen muotoisesta valotusalueesta.

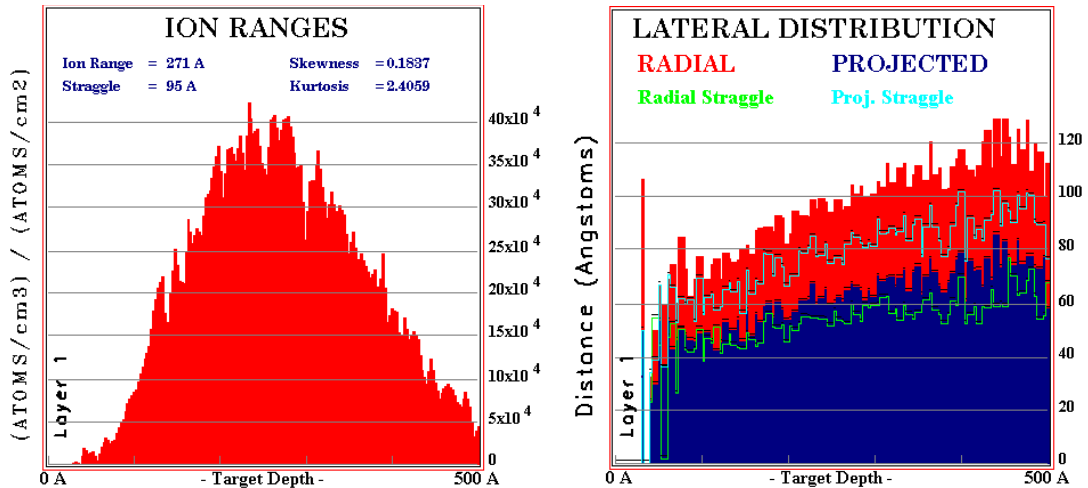
Käytetyssä valotuskuviossa on kahdentyyppisiä ruutuja, joissa joko valotusalueiden tai niiden välien leveys pienenee siirryttäessä oikealle. Virran kasvaessa siirryttiin käyttämään pienempiä suurennuksia ja annokset pinta-alayksikköä kohti pidettiin koko ajan samoina. Kuviot valotettiin kymmenen pyyhkäisykierroksen aikana. Suorakaiteita käytetään, koska ne eivät ole yhtä herkkiä astigmatismille kuin reiät. Resoluutiomittaukset ovat tällöin myös helpompia tehdä ja lisäksi ne antavat luotettavampia tuloksia. Valotuspisteet ja niiden valotusajat sisältävä komentotiedosto tehtiin Matlabilla.

Kuvassa 32 on vierekkäin liian lähellä toisiaan olevia viivoja sekä rajatapaus, jossa viivat ovat juuri ja juuri irti toisistaan. Kulmaerotuskyvyn testejä voidaan harkita tarpeen vaatiessa. Lopullinen resoluutio mitataan SEM-kuvista vasta ICP-RIEn jälkeen, sillä annos-etsausaika - käyrä määrää, kuinka paljon ioneja sisältävä alue syöpyy prosessissa. Amorfisoituneiden alueiden tiedetään etsautuvan samalla nopeudella kuin kiteisen materiaalin. Tutkittavia asioita ovat minimiannos ehjälle viivalle ja saman annoksen viivojen minimietäisyys. Prosessi olisi syytä toistaa useita kertoja satunnaisvaihtelun eliminoimiseksi. Virhearviot joudutaan jälleen tekemään



Kuva 32: Viivanleveysmittauksen kriteerit.

SEM-kuvista. Jokainen ruutu kuvattiin etsauksen jälkeen SEMillä myöhempää analyysia varten. Palkkien ja välien leveys määritettiin SEM-kuvista matlab-koodilla, joka erottaa palkit väleistä niiden välisen sävyeron avulla. Harmaasävykuva tallennetaan Matlabissa matriisiin, jonka alkiaina olevat kokonaisluvut kertovat kunkin pikselin sävyn.



Kuva 33: Vasemmalla ionijakauma pysty akselin suunnassa ja oikealla ionien leviämää vaaka-akselin suunnassa syvyyden funktiona kuvaava kaavio. Molemmat kaaviot on saatu TRIM-simulaatiosta kymmenelletuhannelle ionille.

Kuva 33 esittää TRIM-simulaatiosta saatua ionijakaumaa ja ionien leviämää vaaka-akselin suunnassa syvyyden funktiona. Ionijakaumasta havaitaan, että suurin seostus on 20–30 nm:n syvyydellä. Ionien keskimääräisen etäisyyden pysty akselista havaitaan kasvavan mentäessä syvemmälle noin 40 nm:n syvyyteen asti, minkä jälkeen etäisyys pysyy hetken vakiona ja alkaa sen jälkeen pienentyä mentäessä syvemmälle. Yhtälöllä

$$\text{poikkeama} = \text{FWHM} * \ln(a) / \ln(2) + 20 \text{ nm} \quad \text{FWHM} = \text{puoliarvoleveys} \quad (20)$$

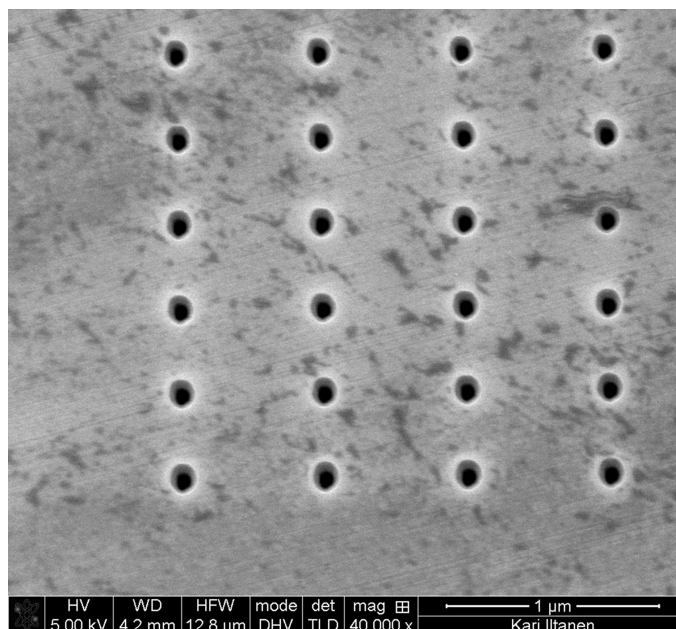
saadaan laskettua arvio palkkien levenemiseen maskin leveyteen nähden käyttäen oletusta, että kun ionisuihkun voimakkuus on enää $1/a$:s osa maksimista, ei kyseiseen

pisteeseen keräänny riittävästi ioneja etsausmaskia varten. Parametri a valitaan käytettävän annoksen mukaan. Kaava (20) toimii vain eksponentiaaliselle muotofunktiolle. Neljännesannokselle a on kymmenen, puolikkaalle annokselle kaksikymmentä ja perusannokselle neljäkymmentä sekä vastaavasti muille annoksille. TRIMin tuloksista puolestaan nähdään, että ionit kulkeutuvat keskimäärin kymmenen nanometrin päähän pisteestä johon ne osuvat. Ionien kulkeutuminen materiaalissa kattaa siis noin 20 nm palkkien kokonaislevenemästä ja loput tulevat ionisuihkun muodosta.

5.2 Tulokset

Tässä osiossa esitetään saadut tulokset. Resoluutio on määritetty sekä simulaatiolla käyttäen kokeellisesti saatua säteen muotoa ja annos-etsausaikakäyrää että kokeellisesti.

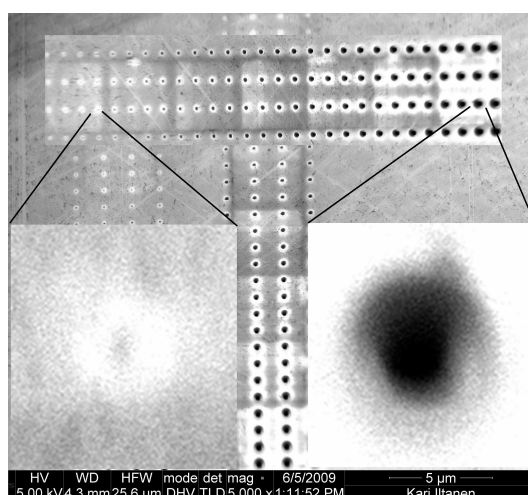
5.2.1 Säteen muoto



Kuva 34: SEM-kuva säteen muodon mittauksessa käytettävistä rei'istä virralla 1.5 pA.

Ionisuihkun muodon määrittäminen pienimmällä virralla (1.5 pA) osoittautui erittäin hankalaksi ionimikroskoopin heikon signaali-kohinasuhteen vuoksi. Mittauksissa oli välillä hankala päättää mistä kohtaa mitta otetaan ja reikien koko ei aina pienentynyt tasaisesti valotusajan lyhetyssä, vaan muutos saattoi olla huomattavasti normaalia suurempi tai pienempi. Ensimmäisellä yrityksellä saadut reiät osoittautuivat erittäin heikkolaatuisiksi, eivätkä ne olleet edes kunnolla ympyräsymmetrisiä, johon oli osasyynä astigmatismi. Mitattava reikä oli musta alue epämääräisessä

kuopassa, jonka reunalle oli kerääntynyt korkeampi valli alueen keskeltä irronneesta materiaalista. Kun valotusaikaa kasvatettiin tietyn kynnsarvon yli, reikä ei enää ollut epämääräinen alue kuopan pohjalla, vaan täytti koko vallin sisäpuolisen alueen. Valli hävisi valotusajan kasvaessa ja ionisuihkun fokusoinnin tullessa kohdalleen. Edellä kuvatut ongelmat johtuivat pitkälti ionisuihkun kohdistuksen epäonnistumisesta, sillä seuraavilla kerroilla edelläkuvattu ongelma kyettiin välttämään. Kuvassa 34 on virralla 1.5 pA tehdyn reikämatriisin loppupää, jossa reiät ovat onnistuneet erittäin hyvin.



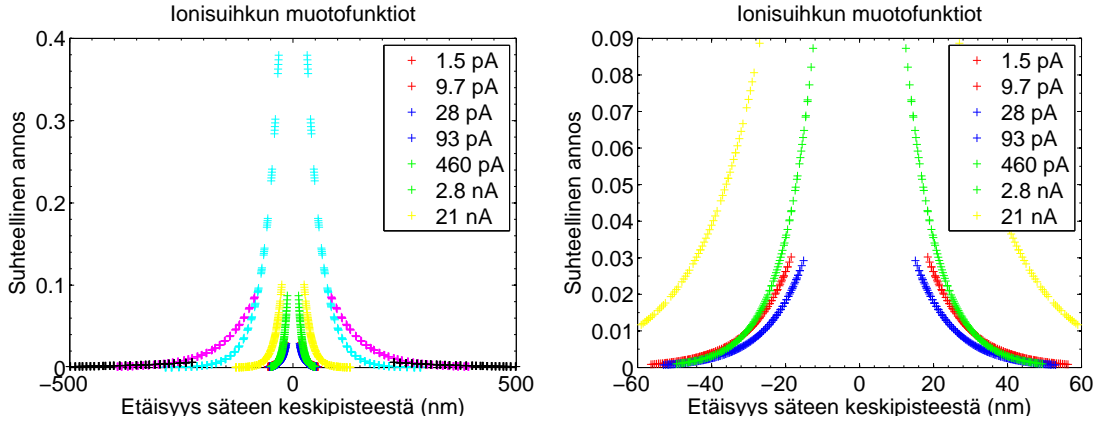
Kuva 35: SEM-kuva säteen muodon mittauksessa käytettävistä rei'istä virralla 460 pA.

Kuvasta 35 havaitaan kuinka huonosti reikä erottuu pienemmillä valotusajoilla, mutta edettäessä rakenteen pystyakselin suunnassa suurempia valotusaikoja kohti reiät tulevat terävämmiksi ja kuvan laatu paranee. Kuvaan on myös suurennettu reikä matriisiin alku- ja loppupäästä. Tärkeimmät syyt kuvan sumeuteen ovat elektronimikroskoopin kohdistuksen hankaluus tasaisella pinnalla ja näytteen pinnassa oleva alumiinioksidi.

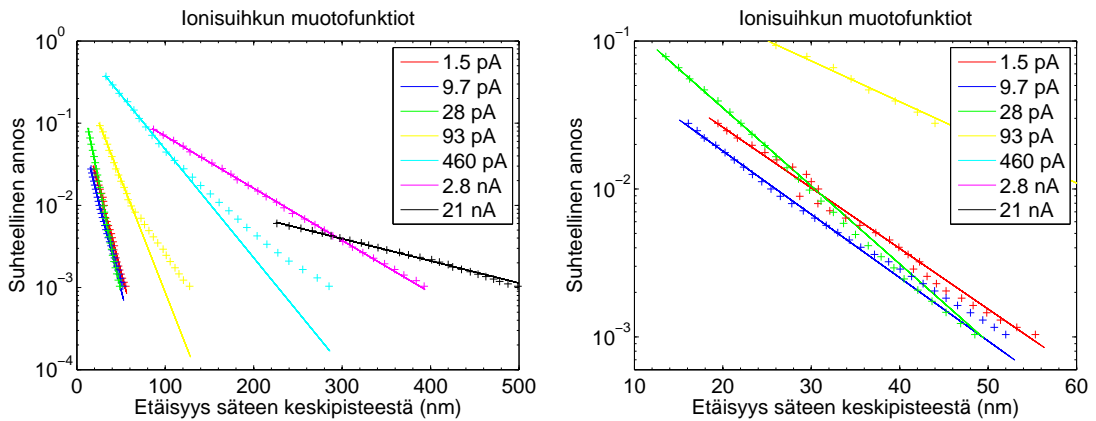
Taulukko 6: Ionisuihkun puoliarvonleveydet eri virroille.

Virta (pA)	Mitattu puoliarvoväisyys (nm)	Valmistajan ilmoittama puoliarvoväisyys (nm)
1.5	14.7	7
9.7	14.1	13
28	11.4	17
93	21.9	24
460	45.6	35
2800	94.8	66
21000	224	274

Taulukkoa 6 tarkastelemalla havaitaan, että vain virroilla 9.7 ja 93 pA kokeellisesti määritetty puoliarvoväisyys on kymmenen prosentin sisällä valmistajan ilmoittamas-



Kuva 36: Mittausaineistoon sovitetut ionisuihkun muotofunktiot.



Kuva 37: Muotofunktioiden ja mittausaineiston yhteensopivuus.

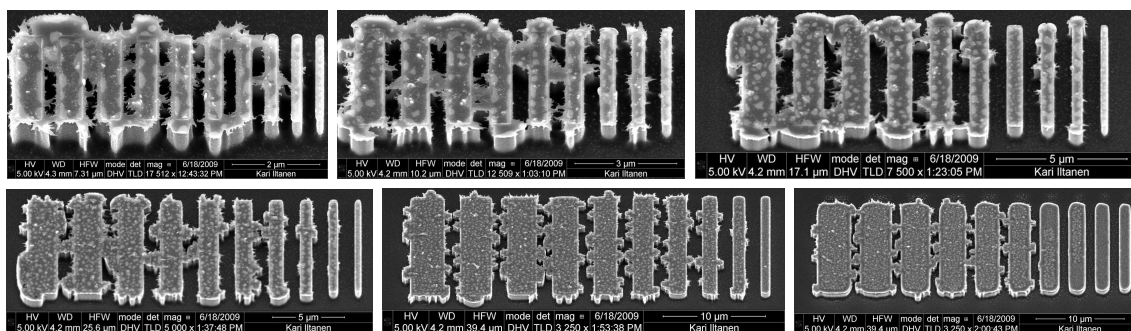
ta arvosta. Alle kolmanneksen sisään valmistajan ilmoittamasta arvosta päästään kaikilla muilla virroilla paitsi 2.8 nA ja 1.5 pA, joille poikkeamat valmistajan ilmoittamasta arvosta ovat noin 44 ja 110 prosenttia. Valmistaja ei ilmoita ovatko arvot puoliarvoveyksiä. Oletus puoliarvoveyksistä tehtiin, koska ne ovat todennäköisimpiä. Kuvasta 37 nähdään, että sovitukset ovat onnistuneet hyvin mikä kertoo kerätyn aineiston tasalaatuisuudesta. Sovituksen laadun havaitaan heikkenevän, kun loitotaan säteen keskipisteestä johtuen todennäköisesti siitä, että valmistaja ei ole vaivautunut optimoimaan ionisuihkun reuna-alueita. Ionisuihkun todellinen puoliarvoveveys otetaan sen Gaussiselta alueelta, joten saatuja tuloksia voi pitää kohtuullisina ottaen huomioon sen, että ne on saatu eksponentiaalisen muotofunktion perusteella. Ionitykin apertuurit kuluvat käytössä, mikä vääristää saatavia mittaus-tuloksia pahiten eniten käytetyillä virroilla.

Kuvasta 36 nähdään kuinka pienempien virtojen muotofunktiot ovat osittain päällekkäin ja suurimman virran muotofunktio nousee loivasti verrattuna muihin muotofunktioihin, mutta vertaileminen on hankalaa suurimman virran mittausaineiston sisältäessä tietoa vain yli 400 nm:n rei'istä. Suurin ongelma tehdyissä mittauksissa on pienten reikien puute, joka estää ionisuihkun kärjen todellisen muodon mää-

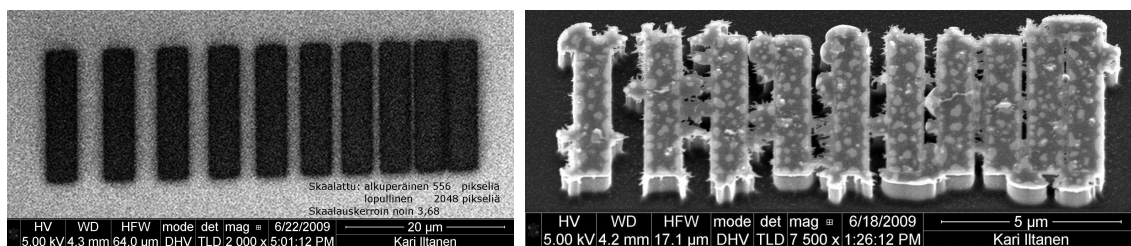
rittämisen. Alumiinioksidikalvon läpäisemiseen vaadittavalla annoksella myös reiän ympärillä oleva alue syöpyy melko laajalla alueella. Kun annos on riittävän suuri, reiän ympärillä olevan alueen koko verrattuna reiän kokoon tulee merkityksellömäksi. SEM-kuvasta voi todeta melko pienten reikien olemassaolon, mutta niitä ei pystytä mittaamaan koska ne eivät erotu riittävän hyvin. Käytetty eksponentiaalinen approksimaatio ei ole pätevä todellisen muotofunktion keskialueella, jota ei saa näkyviin olemassaolevan aineiston perusteella.

5.2.2 Resoluutio

Aiemmin esitellyn testikuvion palkit levenevät ionisuihkun muodon määräämällä tavalla. Levenemän suuruus riippuu käytetystä virrasta ja annoksesta sekä suurenuksesta. Testien perusteella voidaan todeta, että palkit onnistuivat välejä paremmin.



Kuva 38: SEM-kuvat virroille 9.7 pA, 28 pA, 93 pA, 460 pA, 2.8 nA ja 21 nA ruudusta r11.



Kuva 39: SEM-kuvat virralla 93 pA (suurennus 2500x) tehdyistä viivoista ennen ja jälkeen etsauksen (ruutu r21).

Tutkittaessa resoluutiotestikuvioista otettuja SEM-kuvia havaitaan, että kaikissa kaksinkertaisen annoksen ruuduissa (r11 ja r21) palkkien päihin on jäänyt epämääräinen alue, joka yleensä pienenee siirryttäessä ruudussa oikealle päin eli palkkien kavetessa. Virran arvolla 21 nA nähdään edelleen samanlaisia poikkeamia, mutta niiden koko suhteessa palkin kokoon on pienentynyt ja ne sijaitsevat palkin kaikilla reunoilla. Epämääräiset alueet siirtyvät virran kasvaessa palkkien päistä niiden sivuille. Alueiden koko ja sijainti vaihtelevat palkeittain, joten niiden synnyn takana

on oltava jokin satunnaisilmiö. Kuva 38 esittää edellä kuvattua tilannetta. Osasyynä ioniseostuksen leviämiseen on ioni-istutuksen aikana tapahtuva sputteroituminen, joka lennättää seostettua materiaalia joka suuntaan mutta vain palkkien päihin voi kertyä riittävästi materiaalia yhtenäiseen kerrokseen seostettua materiaalia.

Kuvasta 39 puolestaan nähdään, ettei ennen etsausta otetusta kuvasta kykene erottamaan mitään, mikä selittäisi etsauksen jälkeen otetussa kuvassa näkyvät epämäärisyydet. Kuvasta kyllä havaitaan, että ionisuihku on tehnyt käsittelylle alueelle jopa yli kymmenen nanometriä syvän kolon. Näistä koloista irronneen materiaalin seostusaste kasvaa kolon syvetessä. Kun materiaalia irtoaa niin paljon, että se muodostaa etsausta kestäväen yhtenäisen kerroksen, seostettua materiaalia käytettävä annos on liian suuri.

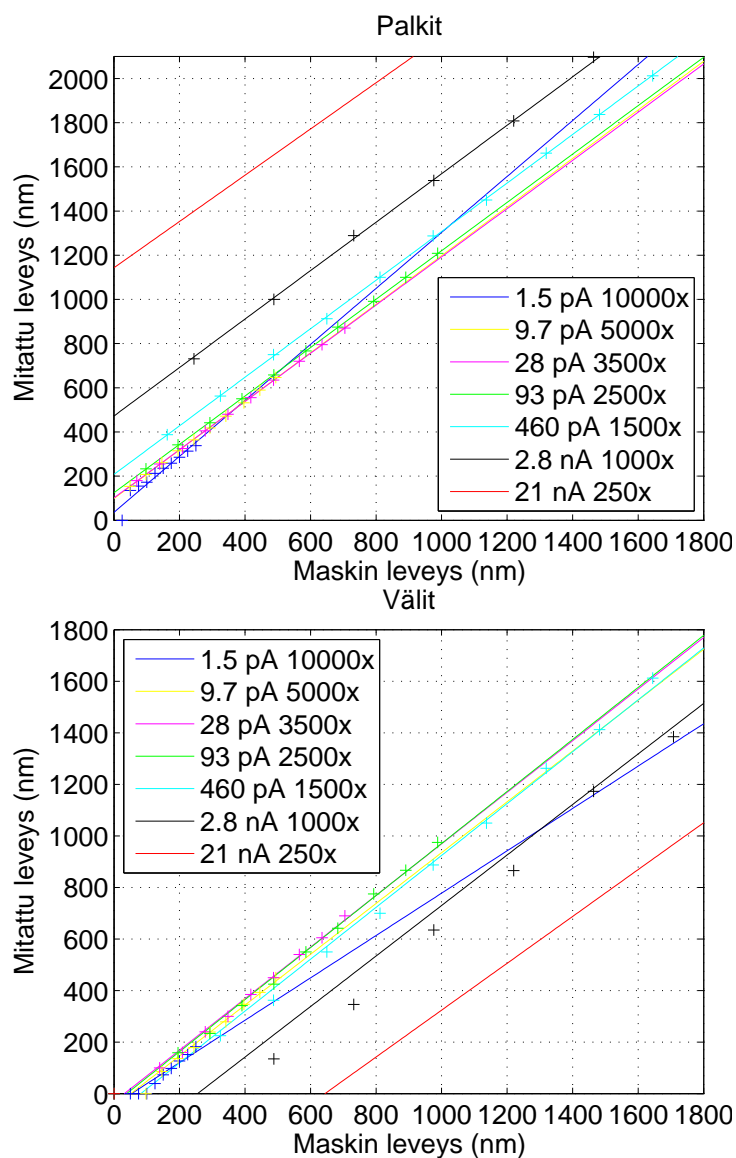
Etsatuista kuvioista otetuista SEM-kuvista havaitaan, että neljännesannoksen saaneet alueet ovat vielä kestäneet mutta kahdeksasosa-annoksen saaneet alueet ovat tuhoutuneet. Kapeimmat pilarit rikkoutuivat, koska ne katkesivat etsausprosessin aikana alareunastaan. Jos oletetaan, että saatava etsausprofiili on negatiivinen vain neljän asteen kulmassa ja pilarin korkeus on 600 nm, tällöin pilarin yläreunan leveyden on oltava vähintään 84 nm, jotta se pysyisi eheänä.

Mitattuja palkkien ja välien leveyksiä verrattiin maskin leveyksiin säteen muodosta johtuvien poikkeamien tutkimiseksi. Maskin koon ja mitatun leveyden välisen suhteen arvioimiseksi saatuun pistejoukkoon sovitettiin suora, joka kuvaa mitattua leveyttä maskin leveyden funktiona. Saatu suora sopii pistejoukkoon erittäin hyvin, vaikkakin välien kohdalla sovitukset ei ole niin hyvä kuin palkeille. Näin saatuja suoria ekstrapoloidaan alkuperäisen pistejoukon ulkopuolelle, jotta tarkasteluja voidaan tehdä koko aineiston käsittämällä alueella.

Kuvassa 40 olevia käyrästöjä tarkasteltaessa havaitaan, että virtojen 9.7 pA, 28 pA ja 93 pA kuvaajat ovat melkein päällekkäin sekä palkeilla että väleillä. Tästä kuvioista voidaan tutkia millä virralla kannattaa tehdä tietyn kokoinen kuvio. Kuvasta nähdään myös, että virralla 28 pA ja suurennuksella 3500x voidaan tehdä samankokoisia kuvioita kuin virralla 9.7 pA ja suurennuksella 5000x. Saatujen tulosten perusteella 9.7 pA:lla ionisuihkon kohdistus ei ole täydellisesti onnistunut, sillä 9.7 pA:lla saatavien kuvioden pitäisi olla hieman pienempiä kuin 28 pA:lla. Kyseisistä kuvista voidaan myös todeta, että alle sadan nanometrin rakenteita voi tehdä vain 1.5 pA:lla. Sataan nanometriin voi päästä ekstrapolaation perusteella vielä 28 pA:lla. Suurimmalla virralla ei voi tehdä kuin yli yhden mikrometrin kokoisia rakenteita. Kuvassa 40 olevat käyrästöt tarkastelualueen alkupäästä löytyvät liitteestä A koko sivun kokoisina koko tarkastelualueen käsittävien käyrästöjen lisäksi.

Seuraavaksi tarkasteltiin mitattujen arvojen poikkeamaa vastaavista maskin arvoista vähentämällä ensimmäisestä jälkimmäinen ja laskemalla näin saaduista arvoista ruutukohtaiset keskiarvot ja -hajonnat. Näin saadut palkkien keskiarvot piirretään annoksen funktiona yhteen kuvaan ja välien toiseen käyttäen logaritmisia x- ja y-akseleita.

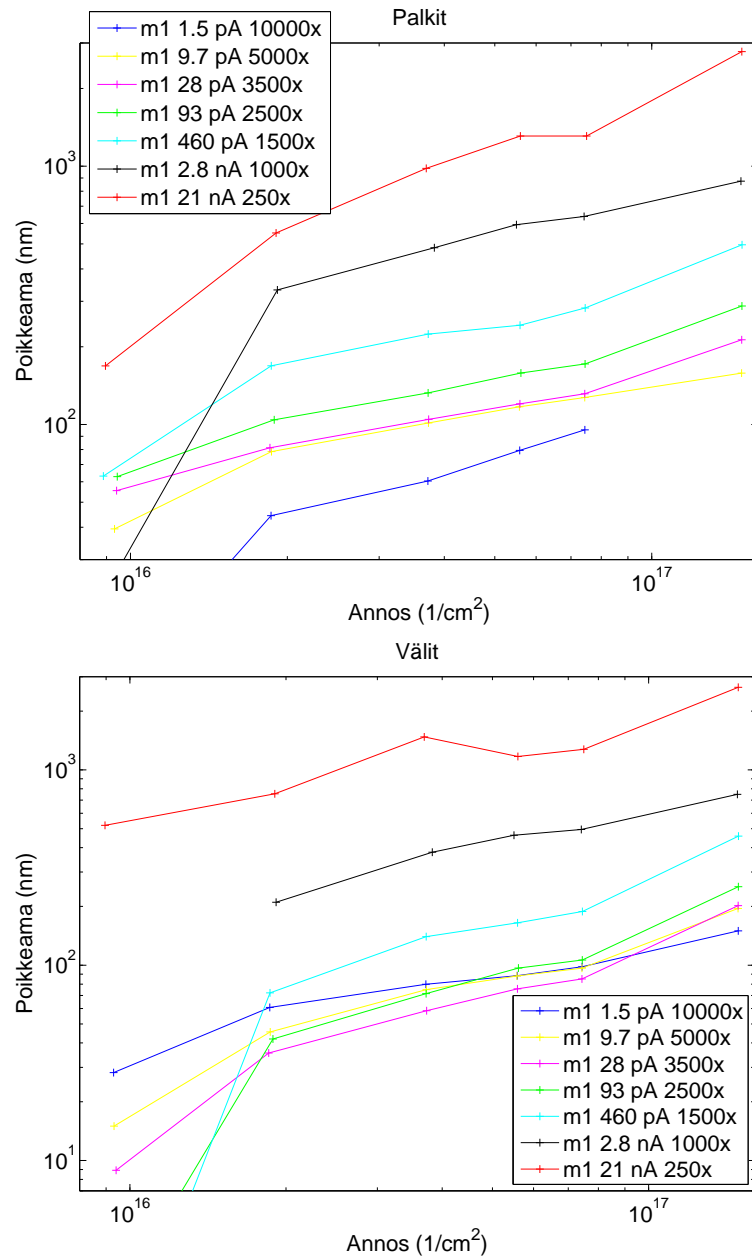
Kuvasta 41 havaitaan, että palkkien levenemän kannalta 28 pA 3500x ja 9.7 pA 5000x ovat samanarvoisia. Samasta kuvasta havaitaan myös, että kunkin vir-



Kuva 40: Palkkien (r31) ja välien (r41) leveys maskin leveyden funktiona.

ran kuvaajassa neljä keskimmäistä pistettä ovat likimain samalla suoralla ja lähes yhdensuuntaisia toistensa kanssa. Suurimman virran kuvaajassa olevat epämääräisyydet johtuvat ainakin osittain eri kuvausmoodin käytöstä, ja pienimmällä virralla käytettiin eri mittauskriteerejä, joita voidaan pitää tärkeimpänä syynä, ettei kyseinen kuvaaja ole yhdensuuntainen muiden kuvaajien kanssa.

Vertaamalla laskettuja poikkeamia maskin leveydestä neljännesannoksen palkeille säteen leveydestä ja ionien kulkeutumiseisyydestä laskettuihin arvioihin (taulukko 7) havaitaan, että virtaan 93 pA asti valmistajan ilmoittamien arvojen perusteella saadut tulokset sopivat paremmin kuin mitatuista saadut. Virroille 460 pA ja 2.8 nA mitattujen säteen leveyksien perusteella lasketut arvot sopivat paremmin yhteen mitattujen poikkeamien kanssa. Virralla 21 nA mitatusta säteen leveydestä saatu



Kuva 41: Palkkien ja välien leveyden poikkeama annoksen funktiona.

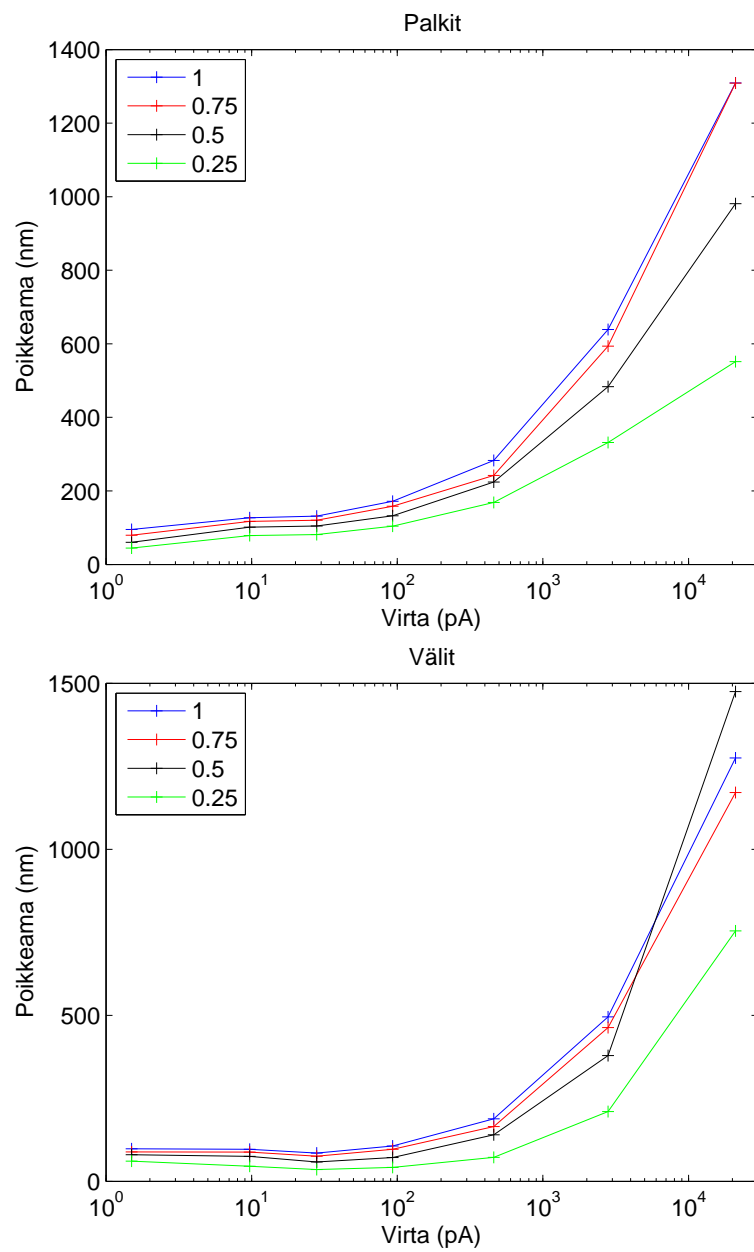
poikkeama osuu neljännes- ja puolikkaan annoksen väliin, valmistajan arvosta saatu tulos vastaan puolikasta annosta. Muille annoksille kaavan (20) perusteella lasketut arviot jäävät selvästi mitatuista arvoista.

Kuvassa 42 olevia mitatun leveyden poikkeamaa maskin leveydestä virran funktiona kuvaavia annoskohtaisia käyriä tarkastelemalla todetaan, että virralla 28 pA päästään yhtä hyvään tai jopa parempaan tulokseen tarkasteltaessa palkkien levenemää maskin kokoon verrattuna kuin 9.7 pA:lla. Samasta kuvasta havaitaan, ettei virran 1.5 pA käytöstä saa mitään etua välien kapeneman kannalta. Tosin palkkien levene-

Taulukko 7: Arviot palkkien levenemästä eri virroille kaavasta (20) sekä mitattu levenemä.

Virta (pA)	Poikkeama mitattujen säteen leveyksien perusteella (nm)	Poikkeama valmistajan ilmoittamien säteen leveyksien perusteella (nm)	Mitattu poikkeama ruudulle r32 (nm)
1.5	68.8	43.2	44.4
9.7	66.7	63.2	78.5
28	57.9	76.5	81.3
93	92.7	99.7	104
460	172	136	169
2800	335	239	332
21000	763	930	551

mä maskiin verrattuna kyseisellä virralla on hiukan pienempi kuin kahdella seuraavalla virralla. Annoksen pieneminen puoleen tai neljännekseen näkyy suurimmalla virralla useiden satojen nanometrien pudotuksena poikkeamassa maskin leveydestä. Virralla 2.8 nA vastaava pudotus on enää enintään sata nanometriä ja neljällä pienimmällä mitatulla virralla korkeintaan noin kymmenen nanometriä.



Kuva 42: Palkkien ja välien leveyden poikkeama virran funktiona, eri käyrät eri annoksille.

6 Johtopäätökset

Tässä työssä karakterisoitiin FIBillä tehtyä gallium-ioniseostusta, jota käytettiin etsausmaskina kryogeenisessä ICP-RIE-etsauksessa. Käytettävät testirakenteet muodostuivat kahdestatoista ruudusta, joista puolessa oli kymmenen tasaisesti kapenevaa palkkia vakiovälein ja toisissa yhdeksän tasaisesti kapenevaa väliä palkkien leveyden pysyessä vakiona. Vastaaville palkkien ja välien ruuduille käytettiin samaa annosta, joten testikuviossa oli kuutta eri annosta vastaavia ruutuja. Käyttämällä edellä esiteltyä testikuviota mitattiin välien ja palkkien leveyksiä kaikkiaan seitsemälle eri virta/suurennusyhdistelmälle. Mittauksia varten testikuvioden jokaisesta ruudusta otettiin SEM-kuva. Kuvien suuren määrän ja samojen mittauskriteerien käyttämiseksi mittaukset tehtiin Matlabin avulla kunkin testikuvion jokaiselle kahdestatoista ruudusta.

Taulukko 8: Pienin mitattu palkin ja välin leveys eri virroille (ruudut r32 ja r22). Seuraavissa sarakkeissa on kirjoitusalueen koko, käytetty suurennus ja perusannoksen valotusaika. Viimeisessä sarakkeessa on valotusaika perusannokselle käyttäen 50 % peittoa.

Virta (pA)	Palkin pienin leveys (nm)	Välin pienin leveys (nm)	Kirjoitusalue (μm)	Suurennus	Valotusaika (μs /pikseli)	Maksimi-valotusaika (50 % peitto)
1.5	112	38.8 (r41)	12.5	10000x	600	80 min
9.7	136	54	25.0	5000x	359	48 min
28	155	70	35.7	3500x	253	34 min
93	209	117	50.0	2500x	150	20 min
460	325	175	83.3	1500x	83.9	11 min
2800	558	135 (r41)	125	1000x	31.1	4 min
21000	1750	999	500	250x	66.5	9 min

Tehtyjen mittausten perusteella voidaan todeta, että tarkasteltava menetelmä toimii hyvin. Taulukossa 8 esitetään pienimmät mitatut palkin ja välin leveydet eri virroille. Kun käytettävä annos on sopivalla tasolla, lopputuloksena saatavissa kuvioissa ei ole poikkeamia ja ne täyttävät laatukriteerit. Toistettavuus riippuu käytännössä siitä kuinka hyvin ionisuihku kyetään kohdistamaan ennen kuvioinnin aloittamista.

Menetelmän suurimmat ongelmat liittyvät ioni-istutuksen aikana tapahtuvaan kontaminoitumiseen eli ioneja päätyy kohdealueen ulkopuolelle. Etsausprosessin tiedetään olevan rajoittava tekijä sekä palkkien että välien leveyden kannalta, sillä kaipaavat välit eivät aukea kunnolla ja alle minimileveyden palkit katkeavat alareunaan. Minimileveydet määräytyvät etsausprofiilista ja -syvyydestä.

Saatavien rakenteiden koon ennustaminen maskin koosta, ionisuihkun muotofunktiosta, ionien leviämisestä ja annos-etsausaikakäyrästä onnistuu melko helposti, vaikka menetelmä kaipaakin kehittämistä tarkempien tulosten saamiseksi. Tähän tavoitteeseen pääsemiseksi erityisesti ionisuihkun muotofunktio pitäisi määrittää nykyistä

paremmin, jotta voidaan arvioida etsausta kestävä alueen koko yhdelle valotuspisteelle ja tietylle valotusajalle. Paras mahdollinen menetelmä rakenteiden koon ennustamiseksi ottaisi huomioon myös useasta valotuspisteestä tulevat efektit sekä ionisuihkun todellisen muodon.

Tässä työssä tarkastellun FIBistä ja kryogeenisestä ICP-RIEstä muodostuvan yhdistelmämenetelmän jatkokehityksessä tulisi keskittyä toistettavuuden varmistamiseen ja parantamiseen sekä pyrkiä pienentämään alle-etsaantumista. Käytettävyyden parantamiseksi kyseisen menetelmän pienin viivanleveys tulisi mitata muillekin kuin jo mitatuille virroille. Karakterisoinnin laatua voidaan puolestaan parantaa toistamalla tehty mittaussarja lisäaineiston keräämiseksi tilastollisten menetelmien käyttöä varten.

Annosmääräkokeita tulee jatkaa optimaalisen annoksen löytämiseksi väliltä 1×10^{16} – $4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$. Kun optimaalinen annos on löydetty, voidaan maskin kokoa muuttamalla etsiä pienin mahdollinen laatukriteerit täyttävä rakenne. Välejä on kohtuullisen helppo kaventaa kasvattamalla annosta, jos tarve vaatii, mutta käytännössä on paras optimoida maskin leveyttä vakioannoksella.

Viitteet

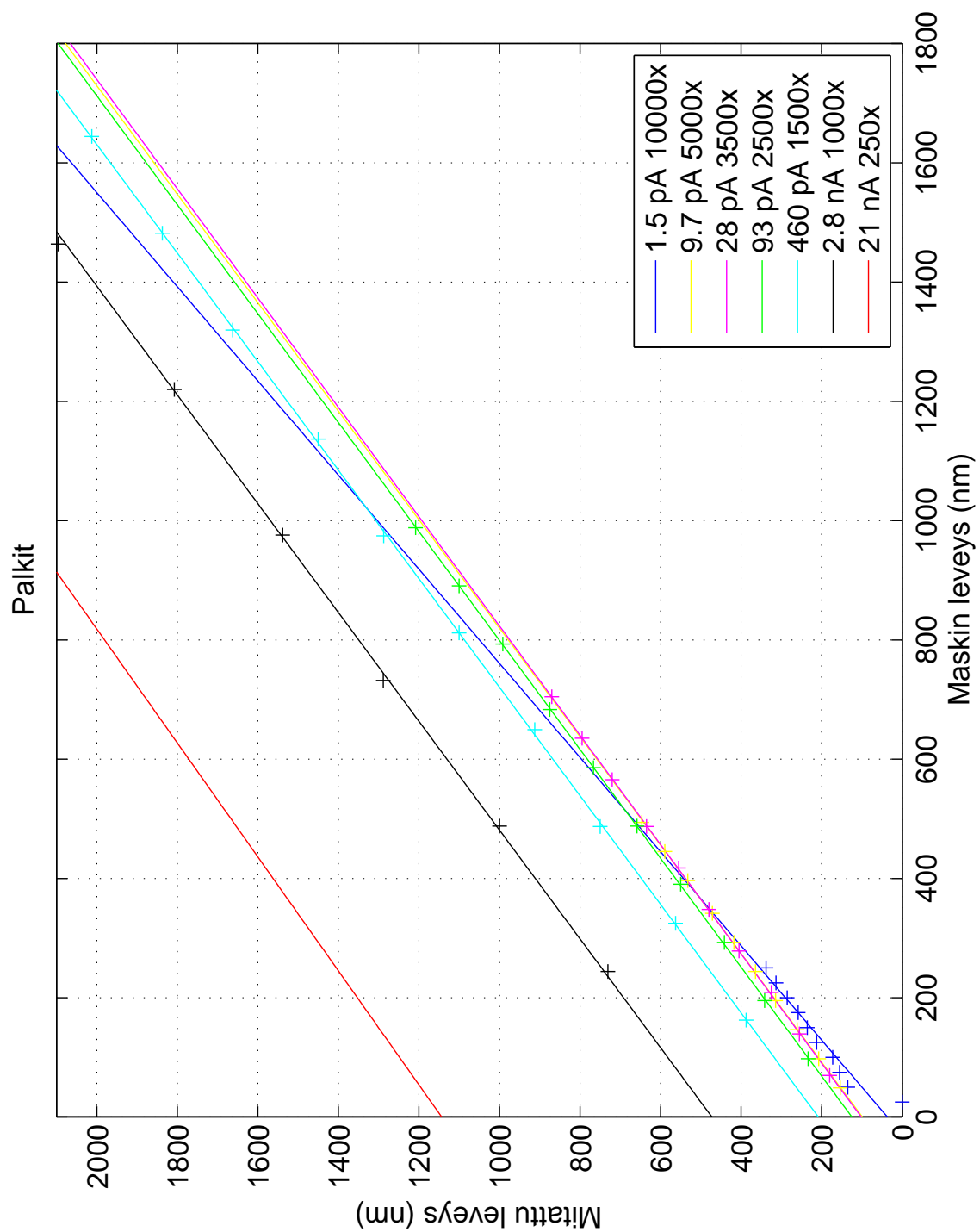
- [1] SRIM Special - Range Statistics. [http://www.srim.org/SRIM/Tutorials/SRIM Special - Range Statistics.doc](http://www.srim.org/SRIM/Tutorials/SRIM%20Special%20-%20Range%20Statistics.doc).
- [2] Suomen nanoteknologian tutkimukseen liittyvien laitteiden tietokanta findnano.fi. <http://www.findnano.fi>. [Verkossa; haettu 15-toukokuuta-2009].
- [3] Beneq. TFS 500 esite. [http://www.beneq.com/docs/presentations/TFS 500 ALD System Presentation.pdf](http://www.beneq.com/docs/presentations/TFS%20500%20ALD%20System%20Presentation.pdf). [Verkossa; haettu 25-toukokuuta-2009].
- [4] R. Colin Johnson. EETimes.com - MIT: Optical lithography good to 12 nanometers. <http://www.eetimes.com/news/latest/showArticle.jhtml?articleID=209400807>. [Verkossa; haettu 15-toukokuuta-2009].
- [5] IBM Corporation. IBM Research | Almaden Research Center | Focussed Ion Beam (FIB). http://www.almaden.ibm.com/st/scientific_services/materials_analysis/fib/fib_column.gif. [Verkossa; haettu 15-toukokuuta-2009].
- [6] Massimiliano. Di Ventra. *Introduction to nanoscale science and technology*. Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [7] FEI Company. *Helios 600 User Manual*.
- [8] Sami Franssila. *Introduction to microfabrication*. Wiley, 2004.
- [9] Rainer Grötzschel. Rutherford Backscattering Spectrometry (RBS) - SciTopics. http://www.scitopics.com/Rutherford_Backscattering_Spectrometry_RBS.html. [Verkossa; haettu 15-toukokuuta-2009].
- [10] L.J. Guo. Recent progress in nanoimprint technology and its applications. *Journal of Physics-London-D Applied Physics*, 37:123–141, 2004.
- [11] HORIBA. Introduction to XRF Spectroscopy. <http://www.horiba.com/scientific/products/x-ray-fluorescence-analysis/resource/xrf-tutorial/>. [Verkossa; haettu 15-toukokuuta-2009].
- [12] Omni Scientific Instruments. X-ray fluorescence. <http://www.omniinstruments.com/fluorescence.html>. [Verkossa; haettu 15-toukokuuta-2009].
- [13] Oxford Instruments. System100 - Plasma Etch Deposition Tool. <http://www.oxford-instruments.com/products/etching-deposition-growth/tools/tools/system-100/Pages/system-100.aspx>. [Verkossa; haettu 25-toukokuuta-2009].
- [14] MoberlyChan, WJ ja Adams, DP ja Aziz, MJ ja Hobler, G. ja Schenkel, T. Fundamentals of Focused Ion Beam Nanostructural Processing: Below, At, and Above the Surface. *MRS Bulletin-Materials Research Society*, 32(5):424, 2007.

- [15] Caturla, M.J. ja Díaz de la Rubia, T. ja Marqués, LA ja Gilmer, GH. Ion-beam processing of silicon at keV energies: A molecular-dynamics study. *Physical Review B*, 54(23):16683–16695, 1996.
- [16] Hane, M. ja Fukuma, M. Ion implantation model considering crystal structure effects. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 37(9):1959–1963, Sep 1990.
- [17] de Boer, M.J. ja Gardeniers, J.G.E. ja Jansen, H.V. ja Smulders, E. ja Gilde, M.-J. ja Roelofs, G. ja Sasserath, J.N. ja Elwenspoek, M. Guidelines for etching silicon mems structures using fluorine high-density plasmas at cryogenic temperatures. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 11(4):385–401, 2002.
- [18] Beardmore, KM ja Gronbech-Jensen, N. An efficient molecular dynamics scheme for predicting dopant implant profiles in semiconductors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 153(1):391–397, 1999.
- [19] Márius Pavlovic ja Ivan Strašák. *SRIM Supporting Software Module Users Guide*.
- [20] Márius Pavlovic ja Ivan Strašák. Supporting routines for the SRIM code. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 257(1-2):601 – 604, 2007.
- [21] Michael Nastasi ja James Mayer ja James K. Hirvonen. *Ion-Solid Interactions: Fundamentals and Applications (Cambridge Solid State Science Series)*. Cambridge University Press, 1996.
- [22] Pelaz, L. ja Marqués, L.A. ja Barbolla, J. Ion-beam-induced amorphization and recrystallization in silicon. *Journal of Applied Physics*, 96:5947, 2004.
- [23] Tian, S. ja Morris, M.F. ja Morris, S.J. ja Obradovic, B. ja Geng Wang ja Tasch, A.F. ja Snell, C.M. A detailed physical model for ion implant induced damage in silicon. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 45(6):1226–1238, Jun 1998.
- [24] Rubanov, S. ja Munroe, PR. FIB-induced damage in silicon. *Journal of Microscopy*, 214(3):213–221, 2004.
- [25] Chason, E. ja Picraux, ST ja Poate, JM ja Borland, JO ja Current, MI ja de la Rubia, T.D. ja Eaglesham, DJ ja Holland, OW ja Law, ME ja Magee, CW ja muut. Ion beams in silicon processing and characterization. *Journal of Applied Physics*, 81:6513, 1997.
- [26] B. Schmidt ja S. Oswald ja L. Bischoff. Etch rate retardation of Ga^{+} -ion beam-irradiated silicon. *Journal of The Electrochemical Society*, 152(11):G875–G879, 2005.
- [27] Posselt, M. ja Schmidt, B. ja Feudel, T. ja Strecker, N. Atomistic simulation of ion implantation and its application in Si technology. *Materials Science & Engineering B*, 71(1-3):128–136, 2000.

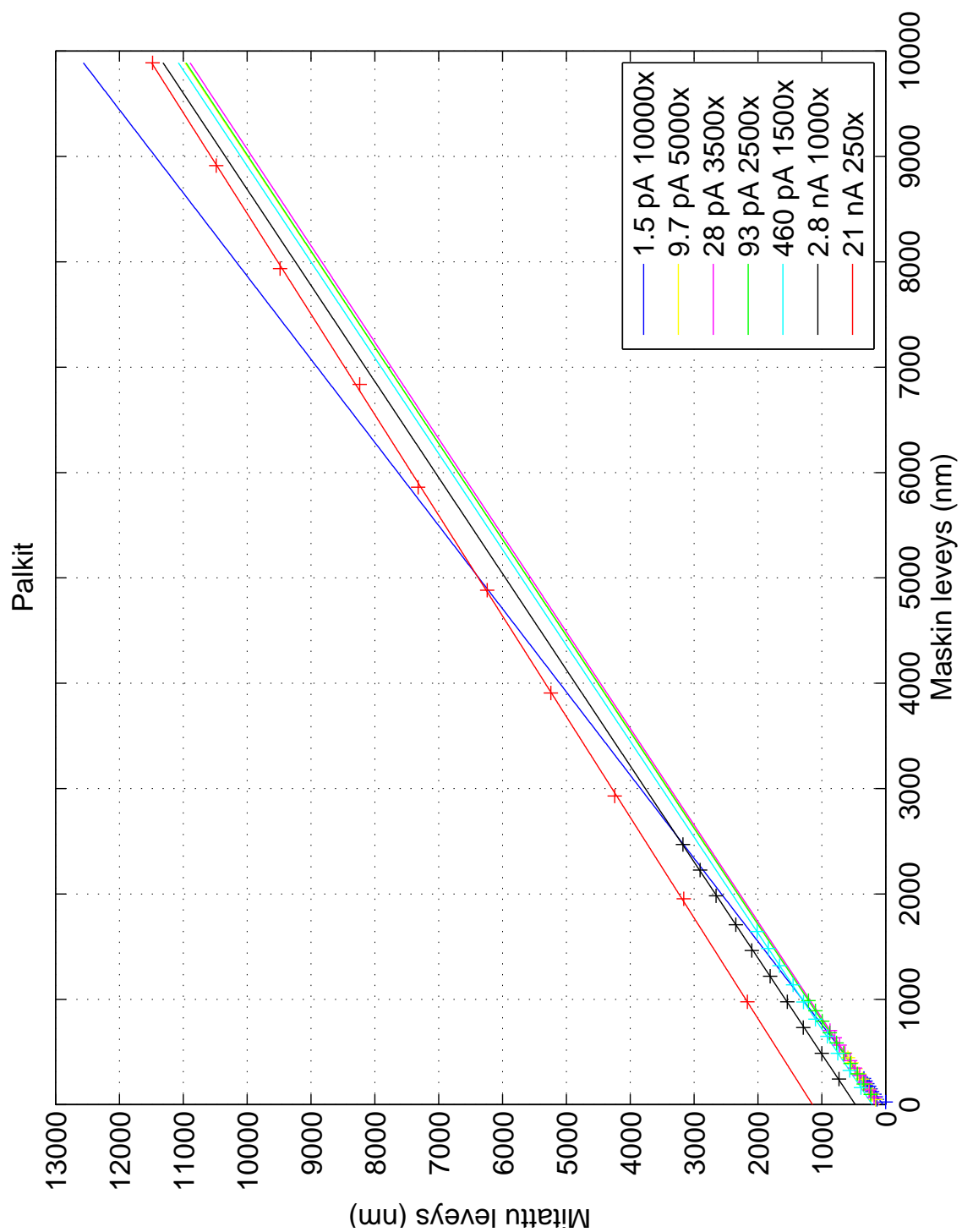
- [28] Qian, HX ja Zhou, W. ja Miao, J. ja Lim, L.E.N. ja Zeng, XR. Fabrication of Si microstructures using focused ion beam implantation and reactive ion etching. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 18(3):35003, 2008.
- [29] Mikko Ritala Markku Leskelä. Atomic Layer Deposition Chemistry: Recent Developments and Future Challenges. *Angewandte Chemie International Edition*, 42(45):5548–5554, 2003.
- [30] MathWorks. *MATLAB - Documentation*. <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/techdoc/index.html?/access/helpdesk/help/techdoc/math/f2-14970.html>, kohta: Example: Curve Fitting.
- [31] Oxford Instruments. *Plasmalab System 100 User Manual*.
- [32] A.A. Tseng. Recent Developments in Nanofabrication Using Focused Ion Beams. *small*, 1(10):924–939, 2005.
- [33] B. Vincent Crist. File:System2.gif - Wikipedia, the free encyclopedia. <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=File:System2.gif&oldid=284602906>, 2009. [Verkossa; haettu 15-toukokuuta-2009].
- [34] J. F. Ziegler. *The Stopping and Range of Ions in Solids (Stopping and Range of Ions in Matter, Vol 1)*. Pergamon Pr, 1985.
- [35] James F. Ziegler. *SRIM : the stopping and range of ions in matter*. Srim, cop. 2008.

Liite A

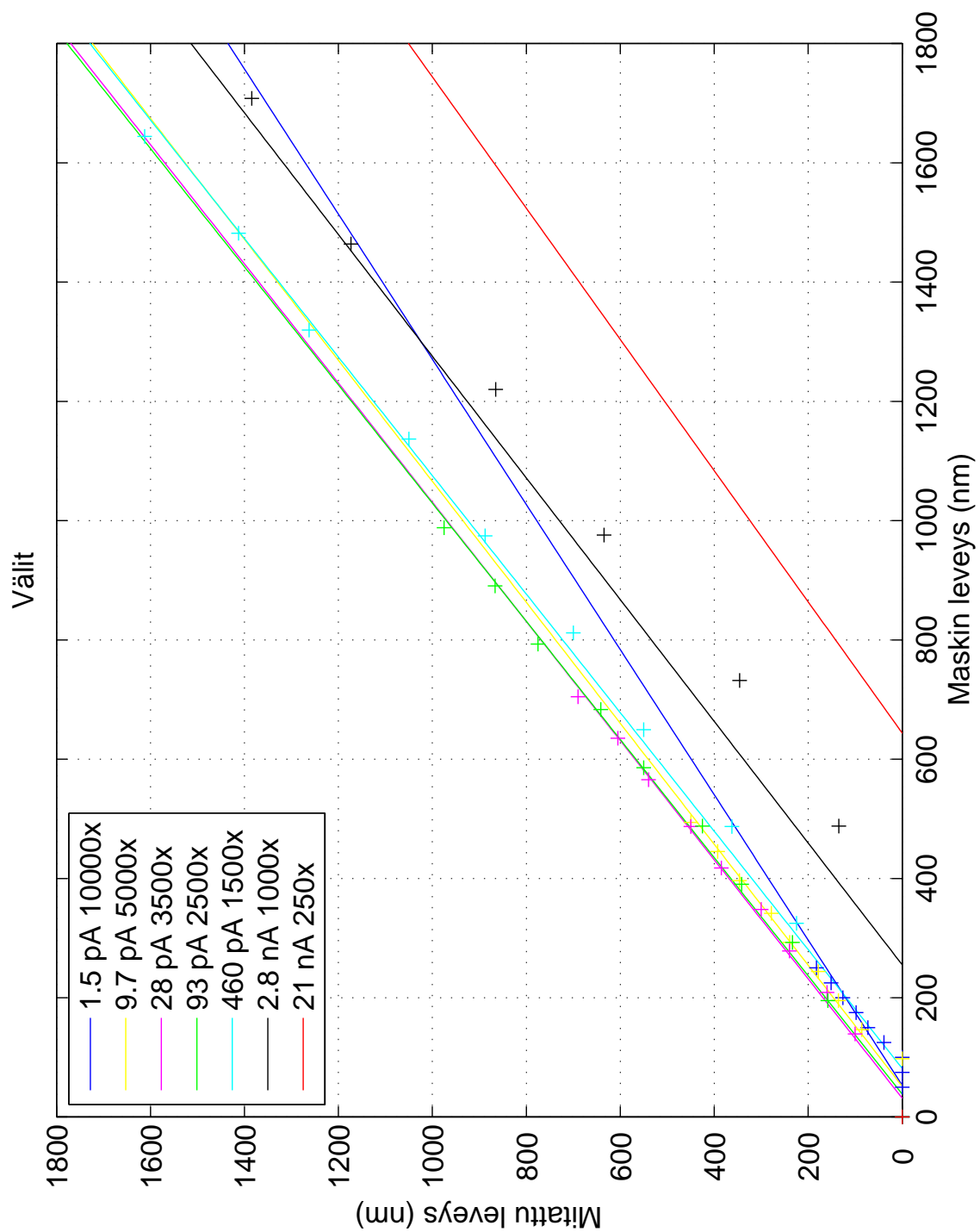
Kuvien [A1-A4](#) avulla valitaan kullekin rakenteelle sopiva virta ja maskin koko puolikkaalle annokselle.



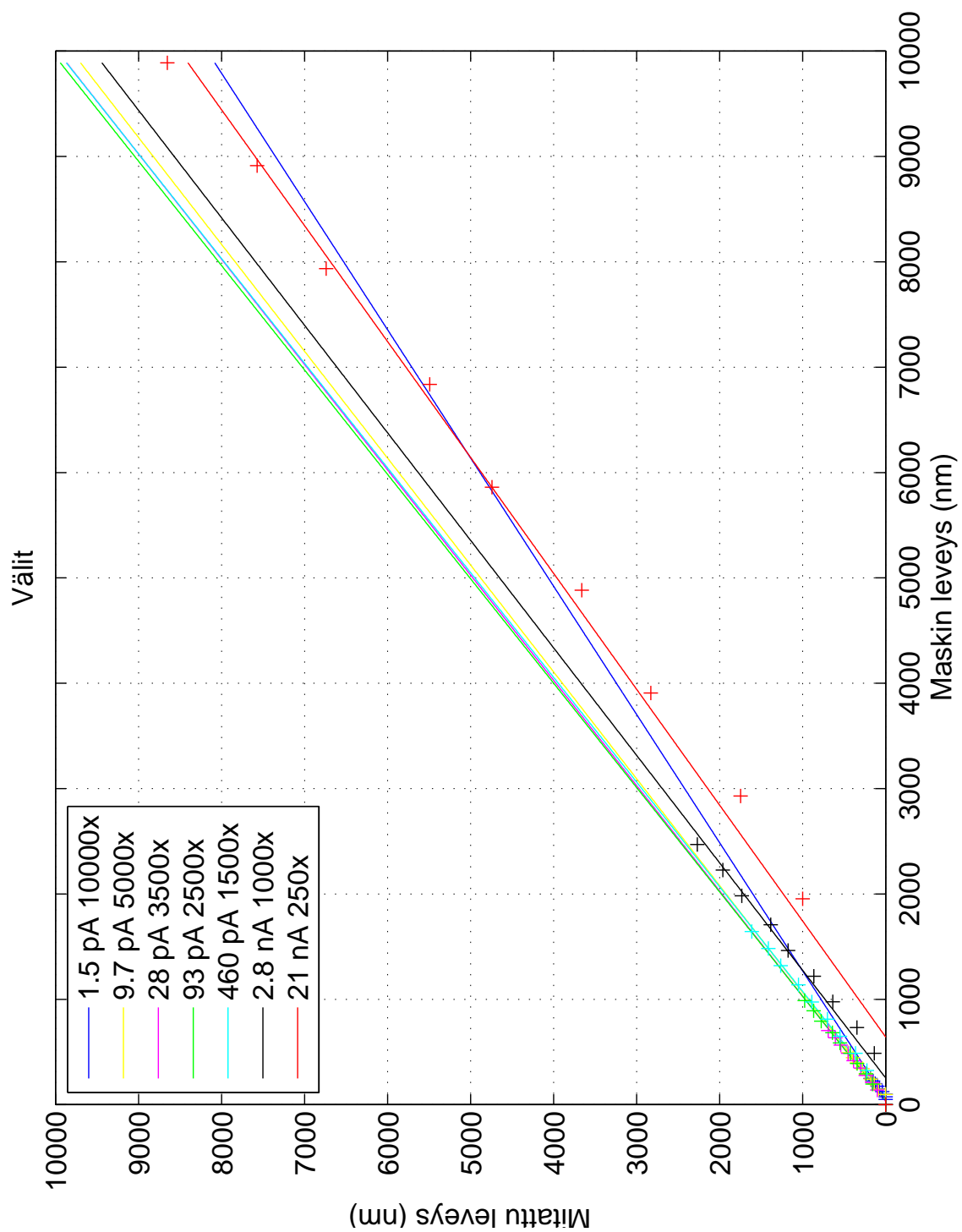
Kuva A1: Palkkien leveys maskin leveyden funktiona (maskin leveys < 1800 nm).



Kuva A2: Palkkien leveys maskin leveyden funktiona.



Kuva A3: Välien leveys maskin leveyden funktiona (maskin leveys<1800 nm).



Kuva A4: Välien leveys maskin leveyden funktiona.